



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2007년11월28일
(11) 등록번호 10-0779993
(24) 등록일자 2007년11월21일

(51) Int. Cl.

G06F 17/50 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2006-0046608

(22) 출원일자 2006년05월24일

심사청구일자 2006년05월24일

(56) 선행기술조사문헌

Particle-Based Fluid Simulation for
Interactive Applications(2003 ACM SIGGRAPH)

Controlling liquids using pressure
jump(Technical Sketch in the ACM SIGGRAPH
2006 Conference 2006.7)

Controlling fluid animation with geometric
potential: Research Articles(Computer
Animation and Virtual Worlds: 2004)

(73) 특허권자

고려대학교 산학협력단

서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내

(72) 발명자

김창현

서울 동대문구 제기동 153 안암골 벽산아파트
105-602

신승호

서울 동대문구 장안3동 현대홈타운아파트 111-405

이정

서울 노원구 공릉2동 서로퍼스트빌 402호

(74) 대리인

현종철

전체 청구항 수 : 총 10 항

심사관 : 선동국

(54) 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법, 그기록 매체 및 그 장치

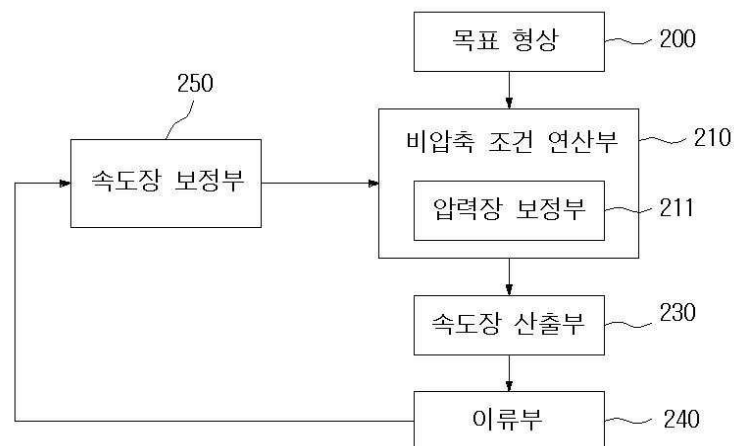
(57) 요약

압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법, 그 기록 매체 및 그 장치가 개시된다.

본 발명은 본 발명은 유체의 레벨 셋에 대응하고 상기 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출하는 단계, 상기 제어값을 상기 유체의 압력장에 적용하고, 상기 유체 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 상기 유체 경계면의 압력장을 산출하는 단계, 상기 보정된 압력장을 상기 유체의 속도장으로 변환하는 단계 및 상기 속도장에 따라 상기 유체의 경계면 및 상기 유체를 구성하는 파티클들을 이동시키는 단계를 포함한다.

본 발명에 의하면, 액체의 경계면과 목표 형상의 경계면을 정확히 수렴시킴으로써 세밀한 결과물을 얻을 수 있고, 추가적인 작업 없이 기존의 유체 시뮬레이션을 응용할 수 있으며, 유체의 비 압축 조건과 안정성에 영향을 미치지 않고, 유체의 움직임을 현실의 자연적인 움직임에 기반하게 할 수 있고, 사용자의 개입 없이 정확한 제어가 가능하며, 추가적인 연산 없이 빠르게 시뮬레이션을 수행할 수 있고, 경계면에 가하는 힘과는 독립적으로 액체 전체에 추가적인 외력을 줄 수 있으며, 제어하는 힘과 독립적인 저항력을 더함으로써 진동을 감소시킬 수 있다.

대표도 - 도2



특허청구의 범위

청구항 1

유체의 레벨 셋에 대응하고 상기 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출하는 단계;

상기 제어값을 상기 유체의 압력장에 적용하고, 상기 유체의 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 상기 유체의 경계면의 보정된 압력장을 산출하는 단계;

상기 보정된 압력장을 상기 유체의 속도장으로 변환하는 단계; 및

상기 속도장에 따라 상기 유체의 경계면 및 상기 유체를 구성하는 파티클들을 이동시키는 단계를 포함하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 목표 형상은

소정의 음함수로 정의되는 것을 특징으로 하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 유체의 이동 속도에 비례하고, 상기 유체의 이동 방향과 반대 방향인 저항력값으로 상기 유체의 속도장을 보정하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 유체의 경계면의 보정된 압력장을 산출하는 단계는

상기 유체의 경계면 양쪽에서의 압력을 외삽법에 의해 추정된 고스트 값에 상기 유체의 경계면 양쪽에서 서로 다른 압력의 미분값을 적용하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법.

청구항 5

제 1 항 내지 제 4 항 중 어느 한 항의 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

청구항 6

유체의 레벨 셋에 대응하고 상기 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출하고, 상기 제어값을 상기 유체의 압력장에 적용하고, 상기 유체의 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 보정된 압력장을 생성하는 비압축 조건 연산부;

상기 보정된 압력장을 상기 유체의 속도장으로 변환하는 속도장 산출부; 및

상기 속도장에 따라 상기 유체의 경계면 및 상기 유체를 구성하는 파티클들을 이동시키는 이류부를 포함하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치.

청구항 7

제 6 항에 있어서,

상기 목표 형상은

소정의 음함수로 정의되는 것을 특징으로 하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치.

청구항 8

제 6 항에 있어서,

상기 유체의 이동 속도에 비례하고, 상기 유체의 이동 방향과 반대 방향인 저항력값으로 상기 유체의 속도장을 보정하는 속도장 보정부를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치.

청구항 9

제 6 항에 있어서,

상기 비압축 조건 연산부는

상기 유체의 경계면 양쪽에서의 압력을 외삽법에 의해 추정된 고스트 값에 상기 유체의 경계면 양쪽에서 서로 다른 압력의 미분값을 적용하는 것을 특징으로 하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치.

청구항 10

유체의 레벨 셋에 대응하고 상기 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출하는 단계, 상기 제어값을 상기 유체의 압력장에 적용하고, 상기 유체의 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 상기 유체의 경계면의 보정된 압력장을 산출하는 단계, 상기 보정된 압력장을 상기 유체의 속도장으로 변환하는 단계 및 상기 속도장에 따라 상기 유체의 경계면 및 상기 유체를 구성하는 파티클들을 이동시키는 단계를 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체;

상기 기록매체에 기록된 프로그램을 독출하여 실행시키는 컴퓨터; 및

상기 컴퓨터에서 실행된 결과를 시각적으로 표시하는 디스플레이부를 포함하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치.

명 세 서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

- <12> 본 발명은 유체 시뮬레이션에 관한 것으로, 특히, 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법, 그 기록매체 및 그 장치에 관한 것이다.
- <13> 액체나 기체와 같은 자연 현상을 사실적으로 시뮬레이션하고 가시화하는 유체 애니메이션에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 최근 들어서는 사실적인 시뮬레이션에 그치지 않고, 애니메이터의 의도에 따라 유체의 형상 제어를 수행하는 연구들이 새롭게 각광받고 있다.
- <14> 그동안 3차원 애니메이션이나 영화와 같은 분야에서 유체를 가시화하고 형상제어를 수행하는 기법은 많이 시도되었지만, 대개의 경우 물리적인 법칙을 무시한 채로 애니메이터의 키프레임 정의에 의한 수작업으로 생성되는 경우가 많았다.
- <15> 도 1a는 종래의 유체 시뮬레이션 방법에 따른 목표 형상 형성 과정의 일 예를 도시한 것이다.
- <16> 도 1a에서 보여지듯이, 외력만을 사용하였을 때는 제어 힘의 소실이 발생하여 정확한 토끼 형상으로 변화 하지 못한다. 그 이유는 외력으로 더해진 액체를 제어하는 힘을 속도(velocity) 프로젝션 단계(projection step)에서 뭉개지고 소실되기 때문이다.
- <17> 도 1b는 종래의 유체 시뮬레이션 방법에 적용되는 압력 점프(pressure jump)의 개념을 도시한 것이다.
- <18> 유체 경계면에서 압력의 차이인 압력 점프(pressure jump)는 Γ 에서 불연속으로 존재한다. 왼쪽의 압력과 오른쪽의 압력이 서로 다르다. 위와 같은 경우, 일반적인 유한 차분법(finite differencing)을 사용하면, Γ 주위에서 압력 p 의 미분을 구하는 것이 어렵다.

<19> 이와 같은 불연속 경계면을 제어하는 손쉬운 방법으로 노드 i 의 압력 P_i 와 노드 $i+1$ 의 압력 P_{i+1} 을 Γ 주위로 외삽(extrapolate)한 압력을 고스트 값인 P^G_{i+1}, P^G_i 라 하고 다음의 수학식 1 및 수학식 2가 성립한다고 가정한다.

수학식 1

<20>
$$P^G_i = P_i + J$$

수학식 2

<21>
$$P^G_{i+1} = P_{i+1} - J$$

<22> 수학식 1 및 수학식 2를 정리하면 다음의 수학식 3 및 수학식 4를 도출할 수 있다.

수학식 3

<23>
$$\frac{P_{i+1} + P_{i-1} - 2P_i}{\Delta x^2} = D(x_i) + \frac{J}{\Delta x^2}$$

수학식 4

<24>
$$\frac{P_{i+2} + P_i - 2P_{i+1}}{\Delta x^2} = D(x_{i+1}) - \frac{J}{\Delta x^2}$$

<25> D 는 발산식을 1 차원으로 나타낸 것이다. 압력 점프(pressure jump)인 J 는 수학식 3 및 수학식 4에 나타난 방법으로, 더하거나 뺄 수 있다. 따라서 기존의 포아송 방정식(poisson equation) 풀이 방법을 이용하여 간단히 풀이 가능하다.

<26> 또한, 종래에는 $\sigma \kappa_\Gamma$ 로 J 값을 설정하여 액체의 경계면에 표면장력 힘을 첨가 하였다. κ_Γ 는 이웃 노드(node)의 $\kappa = \nabla \cdot (\nabla \phi / |\nabla \phi|)$ 값을 보간(interpolation)하여 구한 액체 경계면에서의 곡률(curvature) 값이다.

<27> 그러나, 종래의 유체 시뮬레이션 방법은 유체 경계면에서 서로 다른 압력의 기울기를 고려하지 않아 물리법칙에 따르는 정확한 시뮬레이션이 어렵고, 외력으로 더해진 액체를 제어하는 힘이 속도(velocity) 프로젝트 단계(projection step)에서 뭉개지고 소실되어 목표 형상으로 정확하게 수립시키기 어려우며, 이러한 소실을 피하기 위해 제어 힘을 발산 하지 않도록 디자인하는 추가적인 최적화(optimization)을 필요로 하여 연산시간이 추가로 필요한 문제점이 있다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

<28> 본 발명이 이루고자 하는 첫번째 기술적 과제는 세밀한 결과물을 얻을 수 있고, 추가적인 작업 없이 기존의 유체 시뮬레이션을 응용할 수 있으며, 유체의 비 압축 조건과 안정성에 영향을 미치지 않고, 유체의 움직임을 현실의 자연적인 움직임에 기반하게 할 수 있고, 사용자의 개입 없이 정확한 제어가 가능하며, 추가적인 연산 없이 빠르게 시뮬레이션을 수행할 수 있는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법을 제공하는데 있다.

- <29> 본 발명이 이루고자 하는 두번째 기술적 과제는 상기의 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체를 제공하는데 있다.
- <30> 본 발명이 이루고자 하는 세번째 기술적 과제는 상기의 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법이 적용된 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치를 제공하는데 있다.
- <31> 본 발명이 이루고자 하는 네번째 기술적 과제는 상기의 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법을 컴퓨터 상에서 구현하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치를 제공하는데 있다.

발명의 구성 및 작용

- <32> 상기의 첫번째 기술적 과제를 이루기 위하여, 본 발명은 유체의 레벨 셋에 대응하고 상기 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출하는 단계, 상기 제어값을 상기 유체의 압력장에 적용하고, 상기 유체 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 상기 유체 경계면의 압력장을 산출하는 단계, 상기 보정된 압력장을 상기 유체의 속도장으로 변환하는 단계 및 상기 속도장에 따라 상기 유체의 경계면 및 상기 유체를 구성하는 파티클들을 이동시키는 단계를 포함하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법을 제공한다.
- <33> 상기의 두번째 기술적 과제를 이루기 위하여, 본 발명은 상기의 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체를 제공한다.
- <34> 상기의 세번째 기술적 과제를 이루기 위하여, 본 발명은 유체의 레벨 셋에 대응하고 상기 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출하고, 상기 제어값을 상기 유체의 압력장에 적용하고, 상기 유체 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 보정된 압력장을 생성하는 비압축 조건 연산부, 상기 보정된 압력장을 상기 유체의 속도장으로 변환하는 속도장 산출부 및 상기 속도장에 따라 상기 유체의 경계면 및 상기 유체를 구성하는 파티클들을 이동시키는 이류부를 포함하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치를 제공한다.
- <35> 상기의 네번째 기술적 과제를 이루기 위하여, 본 발명은 유체의 레벨 셋에 대응하고 상기 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출하는 단계, 상기 제어값을 상기 유체의 압력장에 적용하고, 상기 유체 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 상기 유체 경계면의 압력장을 산출하는 단계, 상기 보정된 압력장을 상기 유체의 속도장으로 변환하는 단계 및 상기 속도장에 따라 상기 유체의 경계면 및 상기 유체를 구성하는 파티클들을 이동시키는 단계를 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체, 상기 기록매체에 기록된 프로그램을 독출하여 실행시키는 컴퓨터 및 상기 컴퓨터에서 실행된 결과를 시각적으로 표시하는 디스플레이부를 포함하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치를 포함하는 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치를 제공한다.
- <36> 본 발명은 목표 형상인 2차원(2D) 또는 3차원(3D) 데이터를 입력 받아 액체가 자연스럽게 유동하면서 목표 형상으로 변화하도록 시뮬레이션하고 이를 가시화 하는 방법, 그 기록매체, 그 장치에 관한 것이다. 목표 형상은 이미지, 메쉬(mesh), 스케치 등의 데이터 형태로 입력 받을 수 있다.
- <37> 본 발명에서는 일반적인 물뿔 기술과는 달리, 자연스러운 현실 유체 현상을 유지하면서 액체가 형상으로 변화시킨다. 액체와 같은 다상 유체를 시뮬레이션 하기 위해서 나비에 스톡스(Navier-Stokes) 방정식을 풀이해야 한다.
- <38> 본 발명은 다상 유체의 경계면에 초점을 맞추고, 액체 표면의 특성이 살아 있는 실제와 유사한 시뮬레이션을 수행한다.
- <39> 본 발명은 액체가 실제와 같은 유동을 유지 하면서 목표 형상으로 변화하는 힘을 생성하기 위해 목표 형상을 중심으로 기하 위치 에너지 장을 구성 한다. 기하 위치 에너지 장은 목표 형상의 세밀한 부분을 반영 할 수 있도록 목표 형상을 음함수(Implicit Function)로 정의하고 이를 레벨 셋(Level-set) 데이터 구조로 구성한다.
- <40> 본 발명에서는 액체를 제어하는 힘을 외력이 아닌, 압력 장의 형태로 추가 한다. 액체 경계면에 구성되는 압력 값의 차이를 이용하여 액체를 제어하는 것이다. 이러한 수행은 프로젝션 단계(projection step)라는 종래의 시뮬레이션 과정 내부에서 간단히 수행 되며, 추가적인 최적화(optimization)를 필요로 하지 않는다.
- <41> 본 발명은 종래의 유체 시뮬레이션 방법보다 속도가 빠르며, 더욱 세밀한 형상을 유지 할 수 있도록 한다. 또한, 종래의 시뮬레이션 엔진에 간단히 추가 할 수 있다.

<42> 본 발명은 다음의 수학적식 5 및 수학적식 6과 같은 나비에 스토크스(Navier-Stokes) 시뮬레이션(Simulation)을 풀이하여 유체 시뮬레이션을 수행한다.

수학적식 5

<43>
$$\mathbf{u}_t = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}) - \frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{f}$$

수학적식 6

<44>
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

<45> 이때, $\mathbf{u}$ 는 속도 장이고, ν 는 동적 점성도(kinematic viscosity)이며, ρ 는 밀도(density)이다.

<46> 유체 시뮬레이션 방법에서, 외력 $\mathbf{f}$ 는 중력(gravity), 부력(buoyancy), 표면 장력(surface tension forces) 또는 제어 힘(control forces)일 수 있다.

<47> 수학적식 5 및 수학적식 6은 n 번째 시간 단계(time step)에서, Δt 동안 $\mathbf{u}$ 에서 $\mathbf{u}^{**}$ 로 갱신하면서 수행된다. 코린의 프로젝션 방법(Chorin's projection method)에 따라, 수학적식 5는 중간 속도인 $\mathbf{u}^*$ 을 이용하여 다음의 수학적식 7 및 수학적식 8로 나누어진다.

수학적식 7

<48>
$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}''}{\Delta t} = -(\mathbf{u}'' \cdot \nabla)\mathbf{u}'' + \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}'') + \mathbf{f}$$

수학적식 8

<49>
$$\frac{\mathbf{u}'' - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{\nabla p}{\rho}$$

<50> 준 라그랑주 방법(semi-Lagrangian method)을 사용하여 이류(advection)를 수행하여 중간 속도 $\mathbf{u}^*$ 을 구한다. 발산(divergence)식 수학적식 8을 다음의 수학적식 9와 같이 푸아송(Poisson) 식의 형태로 나타낼 수 있다.

수학적식 9

<51>
$$\nabla^2 p = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot \mathbf{u}^*$$

<52> 압력은 수학적식 9의 풀이에 의해 결정되며, 최종 속도는 다음의 수학적식 10에 의해 결정된다.

수학적식 10

<53>
$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla p$$

<54> 유체 시뮬레이션에서는 유체 경계면을 찾고 유지하는 것이 중요하다. 본 발명에서는 부호를 갖는 거리 함수(signed distance function)인 Φ 를 사용하여, 액체와 같은 서로 다른 두 유체의 경계면을 표현한다. $\mathbf{u}$ 에 의한 Φ 의 이류(advection)는 다음의 수학적식 11과 같은 레벨 셋 방정식(level-set equation)으로 묘사할 수 있다.

수학식 11

$$\phi_t + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0$$

<55>

<56> 수학식 11을 수치적으로 풀이하기 위하여 준 라그랑주(semi-Lagrangian) 파티클 레벨 셋 방법(particle level-set method)을 사용한다.

<57> 그러나 종래의 수학식 1 및 수학식 2의 가정을 이용할 경우, 경계면에서 압력의 미분 값이 다른 경우는 고려되지 않는다. 수학식 1 및 수학식 2의 가정에서는 경계면 양쪽의 압력의 미분 값이 항상 동일하며, 따라서 연산되는 속도 또한 동일하다.

<58> 따라서, 본 발명에서는 수학식 1 및 수학식 2를 다음의 수학식 12 및 수학식 13과 같이 수정한다.

수학식 12

$$p_i^G = p_i + J + (p_{i+1}^* - p_{i+2}^*)$$

<59>

수학식 13

$$p_{i+1}^G = p_{i+1} - J + (p_i^* - p_{i-1}^*)$$

<60>

<61> 목표 형상으로 향하는 힘은 다음과 같이 설정된다.

<62> 목표 형상과 액체의 경계면을 부호를 갖는 거리 함수(signed distance function)인 레벨 셋(Level-set) 구조를 이용하여 디리클레 경계 조건(Dirichlet boundary condition)으로 나타낸다. 본 발명에 따른 제어 힘은 유체 경계면에 가해진다. 즉, 경계면의 압력 값의 차이를 이용하여 유체의 경계면에서 유체의 움직임을 결정한다.

<63> 이를 위해 필요한 것이, 레벨 셋(Level set)을 사용한 목표 형상 정의이다. 목표 형상의 데이터로 BMP 이미지, 메쉬(mesh) 파일을 받아서 사용할 수 있다. 목표 형상을 부호를 갖는 거리 함수(signed distance function)인 레벨 셋(Level-set) 구조로 설정하고 시뮬레이션에 사용한다.

<64> 먼저, 시뮬레이션 격자의 모든 노드의 값을 임의의 양수 P_n 으로 설정 한다 (예를 들어, $P_n = 0.1$). 다음, 인접하는 격자 내에 이미지가 존재 하는 노드(node) 또는 메쉬(mesh)의 버텍스(vertex) 데이터가 존재하는 노드(node)의 값은 임의의 음수 N_n 으로 바꾼다 (예를 들어, $N_n = -0.1$). 다음, 양쪽 노드(node)의 값이 한쪽은 음수, 한쪽은 양수가 되는 노드(node)들을 찾아 이를 레벨 셋(Level-set)의 초기 조건으로 정하고, 빠른 마칭 방법(fast marching method)을 사용하여 부호를 갖는 거리 함수(signed distance function)을 정한다.

<65> 마찬가지로 메쉬(mesh) 의 경우 버텍스(vertex)의 수직(normal) 정보를 이용하여 형상의 내부와 외부를 구분 할 수 있다.

<66> 이렇게 목표 형상의 표면은 사용하기 쉽고 명확한 디리클레 경계 조건(Dirichlet boundary condition)으로 주어진다.

<67> 형상 피드백 힘(Shape feed back force)은 다음과 같이 정의된다.

<68> 액체가 형상으로 변하고 형상을 유지해야 한다. 이를 위해서 유체의 경계면과 목표 형상의 표면의 정보를 효과적으로 사용한다.

<69> 형상 피드백 힘(Shape Feedback force)의 효과는 속도장을 발산을 제거(divergence-free)시키는 프로젝션 단계(projection step)에서 쉽게 소실된다. 따라서, 프로젝션 단계(projection step)에서 힘을 살아남기기 위해 추가적인 연산을 수행한다. 본 발명은 형상 피드백 힘(Shape Feedback force)을 프로젝션 단계(projection step) 과정에서 첨가하기 때문에 소실이 없다. 따라서, 본 발명에 따르면, 추가적인 최적화(optimization) 과정이 필요 없으며, 빠른 시뮬레이션을 구현할 수 있다.

<70> 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치의 블록도이다.

<71> 비압축 조건 연산부(210)는 유체의 레벨 셋에 대응하고 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인

제어값을 산출하고, 산출된 제어값을 유체의 압력장에 적용하고, 유체 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 보정된 압력장을 생성한다.

<72> 비압축 조건 연산부(210)는 소정의 유체 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 유체의 경계면의 보정된 압력장을 산출한다.

<73> 바람직하게는, 비압축 조건 연산부(210)는 유체의 경계면 양쪽에서의 압력을 외삽법에 의해 추정된 고스트 값에 유체의 경계면 양쪽에서 서로 다른 압력의 미분값을 적용할 수 있다.

<74> 비압축 조건 연산부(210)는 압력장 보정부(211)를 포함한다.

<75> 압력장 보정부(211)는 유체의 레벨 셋에 대응하고 미리 저장된 목표 형상(200)을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출하고, 제어값을 산출된 압력장에 더하여 보정된 압력장을 생성한다. 바람직하게는, 목표 형상(200)은 소정의 음함수로 정의될 수 있다.

<76> 속도장 산출부(230)는 외력이 적용된 보정된 압력장을 유체의 속도장으로 변환한다.

<77> 이류부(240)는 산출된 속도장에 따라 유체의 경계면 및 유체를 구성하는 파티클들을 이동시킨다.

<78> 속도장 보정부(250)는 유체를 제어하기 위한 소정의 힘 또는 추가적인 제어 힘 즉, 외력(external force)을 유체의 속도장에 적용하여 보정된 속도장을 산출한다.

<79> 바람직하게는, 속도장 보정부(250)는 유체의 이동 속도에 비례하고, 유체의 이동 방향과 반대 방향인 저항력값으로 유체의 속도장을 보정할 수 있다.

<80> 본 발명은 추가적인 외력(external force)으로 저항력을 이용할 수 있다. 목표 형상으로 향하는 힘과 추가적인 외력은 서로 독립되어 주어지고, 독립된 수행 과정에서 연산된다. 본 발명에 따르면, 추가적인 외력이 먼저 독립적으로 주어지고 압력장을 이용하여 프로젝션 단계(projection step)에서 제어 힘이 더 해지므로 힘의 소실이 없다.

<81> 일반적으로 유체를 제어하는 과정에서 유체의 관성에 의하여 목표 형상 근처에서 진동이 발생한다. 이러한 진동을 피하기 위해서 저항력을 이용한다.

<82> 바람직하게는, 저항력은 $F_r = -kv$ 로 설정될 수 있다.

<83> 바람직하게는, 속도장 보정부(250)는 중력값으로 유체의 속도장을 보정할 수 있다.

<84> 본 발명은 액체 제어를 위해 압력장을 구성한다.

<85> 본 발명은 J 값으로 목표 형상의 부호를 갖는 거리 함수(signed distance function)(Level-set)을 이용하여 목표 형상으로 향하는 힘을 제공한다. 액체의 경계면이 목표 형상 외부에 존재 할 때, $J = -\alpha \phi_{target} \Gamma$ 이다.

<86> 본 발명은 J 를 설정하여 목표 형상으로 액체 경계면이 이동하는 힘을 가한다. $\phi_{target} \Gamma$ 는 액체 경계면에 서 목표 형상의 부호를 갖는 거리 함수(signed distance function)(Level-set)값으로 이웃 노드(node)의 ϕ_{target} 값을 보간(interpolation)하여 얻는다.

<87> 액체의 경계면이 목표 형상 내부에 존재 할 때는 액체 표면의 수직(normal) 방향으로 힘을 가해야 한다. J 값으
로 $-\alpha \kappa \Gamma$ 을 사용할 수 있다. 이는 표면장력의 반대 방향을 의미하며 액체 표면의 normal 방향이라는 것은 명
백하지만, 액체의 흠어짐이 발생한다. 따라서, $J = \alpha \phi_{liquid} - \epsilon$ 으로 설정하여 액체의 부호를 갖는 거리
함수(signed distance function)(Level-set)의 미분 방향으로 이동하는 힘을 가한다.

- <88> 위와 같이 정의된 J 값은 수정된 고스트 유체 방법(ghost fluid method)에 사용되어 속도 장을 갱신하는데 사용된다. 이러한 프로젝션 단계(projection step)의 수행은 상술한 형상 피드백 힘(Shape feed back force)의 효과를 나타나게 한다.
- <89> 도 3은 본 발명의 다른 실시예에 따른 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치의 블록도이다.
- <90> 기록매체(310)는 소정의 유체 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 유체 경계면의 압력장을 산출하는 단계, 유체의 레벨 셋에 대응하고 미리 저장된 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출하고, 제어값을 산출된 압력장에 더하여 보정된 압력장을 생성하는 단계, 보정된 압력장을 유체의 속도장으로 변환하는 단계 및 속도장에 따라 유체의 경계면 및 유체를 구성하는 파티클들을 이동시키는 단계를 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 매체이다. 기록매체(310)는 컴퓨터(320)로 읽을 수 있는 형태이다.
- <91> 컴퓨터(320)는 기록매체(310)에 기록된 프로그램을 독출하여 실행시킨다. 컴퓨터(320)는 기록매체(310)에 기록된 프로그램을 독출하는 독출 수단(321) 및 독출된 프로그램을 실행시키는 실행 수단(322)을 포함한다. 독출 수단(321)은 자기 헤드, 광 픽업 장치, 플래쉬 메모리 리더 등을 포함한다. 실행 수단(322)은 마이크로 프로세서, 펌웨어에 의해 동작하는 칩, 메모리 등을 포함한다.
- <92> 인터페이스(325)는 실행 수단(322)에 의해 수행된 시뮬레이션 결과 정보를 디스플레이부(330)에 전달한다.
- <93> 디스플레이부(330)는 컴퓨터에서 실행된 결과를 시각적으로 표시한다. 디스플레이부(330)는 CRT 모니터, LCD 모니터, PDP 표시장치, 프로젝터 등을 포함한다.
- <94> 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법의 흐름도이다.
- <95> 먼저, 유체의 레벨 셋에 대응하고 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출한다(410 과정). 이때, 목표 형상은 소정의 저장 공간에 미리 저장된 상태를 가정한다.
- <96> 제어값이 산출되면, 제어값을 유체의 압력장에 적용하고, 유체 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 유체의 경계면의 보정된 압력장을 산출한다(420 과정).
- <97> 다음, 보정된 압력장을 유체의 속도장으로 변환한다(430 과정).
- <98> 마지막으로, 변환된 속도장에 따라 유체의 경계면 및 유체를 구성하는 파티클들을 이동시킨다(440 과정).
- <99> 도 5는 본 발명의 또다른 실시예에 따른 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법의 흐름도이다.
- <100> 먼저, 유체의 이동속도에 비례하는 저항력값을 생성한다(501 과정).
- <101> 다음, 저항력값으로 유체의 속도장을 보정한다(502 과정).
- <102> 유체의 속도장이 보정되면, 유체의 레벨 셋에 대응하고 유체로부터 목표 형상을 가리키는 방향의 스칼라 값인 제어값을 산출한다(510 과정). 이때, 목표 형상은 소정의 저장 공간에 미리 저장된 상태를 가정한다.
- <103> 다음, 유체 경계면 양쪽에서 서로 다른 압력의 미분값을 산출한다(515 과정).
- <104> 서로 다른 압력의 미분값 및 제어값을 유체의 압력장에 적용하고, 유체 경계면의 비압축 조건을 만족하는 선형 시스템을 이용하여 유체 경계면의 보정된 압력장을 산출한다(520 과정).
- <105> 보정된 압력장이 산출되면, 보정된 압력장을 유체의 속도장으로 변환한다(530 과정).
- <106> 다음, 변환된 속도장에 따라 유체의 경계면 및 유체를 구성하는 파티클들을 이동시킨다(540 과정).
- <107> 마지막으로, 유체의 경계면 및 유체를 구성하는 파티클들이 목표 형상에 도달하였는지 판단하여, 목표 형상에 도달하지 않았으면 위의 과정(501-540 과정)을 반복하고, 목표 형상에 도달하였으면 모든 과정을 종료한다(550 과정).
- <108> 도 6은 본 발명에 적용되는 형상 피드백 힘의 개념을 도시한 것이다.
- <109> 액체의 경계면 위에 있는 목표 형상 외부의 점 P_1 에서의 힘은 목표 형상의 레벨 셋(Level-set) 구조를 사용하여, $-\nabla\phi_{target}/|\nabla\phi_{target}|$ 방향으로 정해져 연산된다.

- <110> 반면에, 목표 형상 내부에 있는 점 P2 에서의 힘은 액체 경계면의 수직(Normal) 방향인 $\nabla \phi_{liquid} / |\nabla \phi_{liquid}|$ 방향으로 주어져 연산된다.
- <111> 도 7은 본 발명의 또다른 실시예에 따라 유체 경계면에서 압력 미분값의 불연속성을 고려하는 과정을 도시한 것이다.
- <112> $(P_{i+1}^* - P_{i+2}^*)$ 와 $(P_i^* - P_{i-1}^*)$ 값은 포아송 방정식(poisson equation) 풀이하기 전에 이전 시간 단계(time step)의 압력으로 연산된 값이며 선형 시스템 풀이에 영향을 미치지 않는다. 액체를 목표 형상으로 제어 할 때, 압력 장을 목표 형상으로 향하는 압력으로 갱신하게 된다. 이러한 압력 장은 액체가 유동하는 위치에 따라 급격히 변화 한다. 수정된 불연속 경계면의 풀이는 임의의 압력을 추가하여 유체를 제어할 때처럼, 압력이 급격히 변화 할 때 효과적이다.
- <113> 도 8은 종래의 유체 시뮬레이션 방법 및 본 발명에 따른 2차원 유체 시뮬레이션 방법의 결과를 비교하여 도시한 것이다.
- <114> 도 8에서 노란색 선은 목표 형상이다. 왼쪽 그림은 외력(external force)로 제어한 것이며, 오른쪽 그림은 본 발명의 유체 시뮬레이션 방법을 이용한 결과이다.
- <115> 도 8은 힘이 평형이 이루어져 더 이상 유체가 유동하지 않을 때까지 시뮬레이션을 수행한 것이다. 본 발명에 따르면, 안으로 오목하고 세밀한 형상에서도 힘의 소실 없이 목표 형상으로 정확히 수렴한다.
- <116> 도 9는 본 발명에 따른 3차원 유체 시뮬레이션의 일 예를 도시한 것이다.
- <117> 도 9는 비너스 형상의 액체가 토끼로 변하는 영상을 보여준다. 도 1a와 비교하여 보면, 본 발명이 토끼 귀와 같이 세밀한 부분까지도 정확하게 수렴시킬 수 있음을 알 수 있다.
- <118> 도 10a 내지 도 10f는 본 발명에 따른 3차원 유체 시뮬레이션의 다른 예를 도시한 것이다.
- <119> 도 10a 내지 도 10f는 주어진 물방울이 제어 힘에 의해 목표 형상인 용으로 변화하고 중력에 의해 떨어지는 것을 보여준다. 본 발명에서는, 압력장으로 표면장력과 형성 힘(shape force)를 가하고, 외력으로 중력을 가하는 등 여러 가지 제어를 수행 할 수 있다.
- <120> 3.0GHz의 Pentium IV processor 3.0GHz 와 1GB RAM을 지닌 Window 기반 PC에서 C++을 사용하여 시뮬레이터를 개발하고 수행하면, 128^3 격자에서 각 시뮬레이션 시간 간격 당 4~5초의 연산시간이 소요 된다. 종래의 유체 시뮬레이션 방법은 최적화 과정을 포함해야 하기 때문에 약 10%의 연산 시간이 추가로 필요한 반면, 본 발명은 2~3%의 연산 시간을 소비하여 목표 형상으로서의 액체 제어를 수행할 수 있다.
- <121> 바람직하게는, 본 발명의 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체에 기록하여 제공할 수 있다.
- <122> 본 발명은 소프트웨어를 통해 실행될 수 있다. 소프트웨어로 실행될 때, 본 발명의 구성 수단들은 필요한 작업을 실행하는 코드 세그먼트들이다. 프로그램 또는 코드 세그먼트들은 프로세서 판독 가능 매체에 저장되거나 전송 매체 또는 통신망에서 반송파와 결합된 컴퓨터 데이터 신호에 의하여 전송될 수 있다.
- <123> 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록매체는 컴퓨터 시스템에 의하여 읽혀질 수 있는 데이터가 저장되는 모든 종류의 기록 장치를 포함한다. 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록 장치의 예로는 ROM, RAM, CD-ROM, DVD±ROM, DVD-RAM, 자기 테이프, 플로피 디스크, 하드 디스크(hard disk), 광데이터 저장장치 등이 있다. 또한, 컴퓨터가 읽을 수 있는 기록매체는 네트워크로 연결된 컴퓨터 장치에 분산되어 분산방식으로 컴퓨터가 읽을 수 있는 코드가 저장되고 실행될 수 있다.
- <124> 본 발명은 도면에 도시된 일 실시예를 참고로 하여 설명하였으나 이는 예시적인 것에 불과하며 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 실시예의 변형이 가능하다는 점을 이해할 것이다. 그러나, 이와 같은 변형은 본 발명의 기술적 보호범위내에 있다고 보아야 한다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의해서 정해져야 할 것이다.

발명의 효과

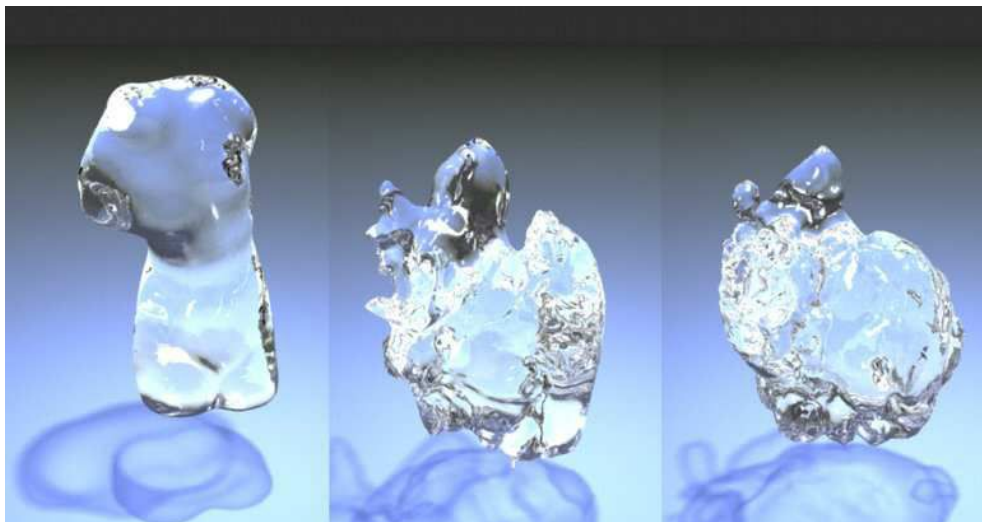
<125> 상술한 바와 같이, 본 발명에 의하면, 다상 유체인 액체의 제어를 수행할 때, 액체의 경계면에서 압력을 이용하여 액체를 제어함으로써, 액체의 경계면과 목표 형상의 경계면을 정확히 수렴시킴으로써 세밀한 결과물을 얻을 수 있고, 추가적인 작업 없이 기존의 유체 시뮬레이션을 응용할 수 있으며, 유체의 비 압축 조건과 안정성에 영향을 미치지 않고, 유체의 움직임을 현실의 자연적인 움직임에 기반하게 할 수 있고, 사용자의 개입 없이 단지 이미지를 입력하는 것으로 정확한 제어가 가능하며, 추가적인 연산 없이 빠르게 시뮬레이션을 수행할 수 있고, 경계면에 가하는 힘과는 독립적으로 액체 전체에 추가적인 외력을 줄 수 있으며, 제어하는 힘과 독립적인 저항력을 더함으로서 진동을 감소시킬 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

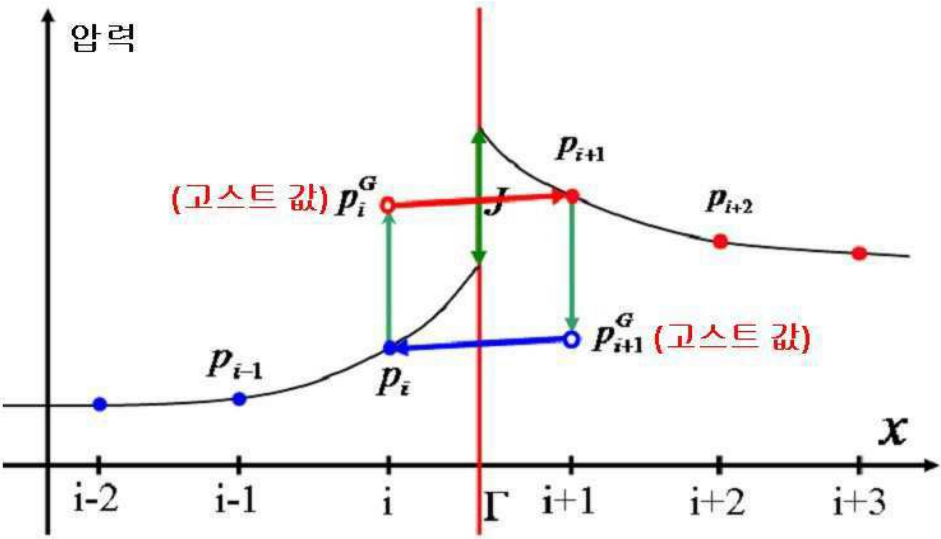
- <1> 도 1a는 종래의 유체 시뮬레이션 방법에 따른 목표 형상 형성 과정의 일 예를 도시한 것이다.
- <2> 도 1b는 종래의 유체 시뮬레이션 방법에 적용되는 압력 점프(pressure jump)의 개념을 도시한 것이다.
- <3> 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치의 블록도이다.
- <4> 도 3은 본 발명의 다른 실시예에 따른 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 장치의 블록도이다.
- <5> 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법의 흐름도이다.
- <6> 도 5는 본 발명의 또다른 실시예에 따른 압력장에 제어값을 적용하는 유체 시뮬레이션 방법의 흐름도이다.
- <7> 도 6은 본 발명에 적용되는 형상 피드백 힘의 개념을 도시한 것이다.
- <8> 도 7은 본 발명의 또다른 실시예에 따라 유체 경계면에서 압력 미분값의 불연속성을 고려하는 과정을 도시한 것이다.
- <9> 도 8은 종래의 유체 시뮬레이션 방법 및 본 발명에 따른 2차원 유체 시뮬레이션 방법의 결과를 비교하여 도시한 것이다.
- <10> 도 9는 본 발명에 따른 3차원 유체 시뮬레이션의 일 예를 도시한 것이다.
- <11> 도 10a 내지 도 10f는 본 발명에 따른 3차원 유체 시뮬레이션의 다른 예를 도시한 것이다.

도면

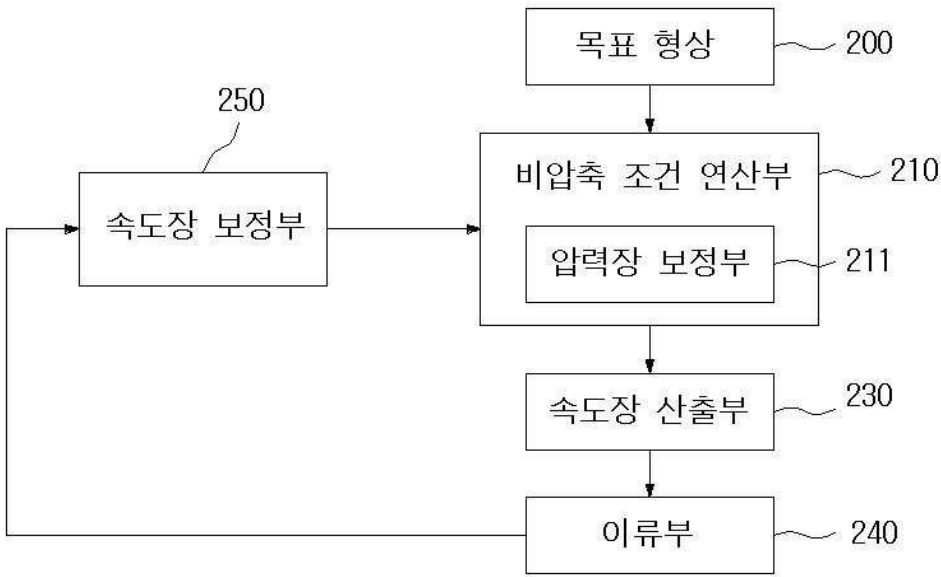
도면1a



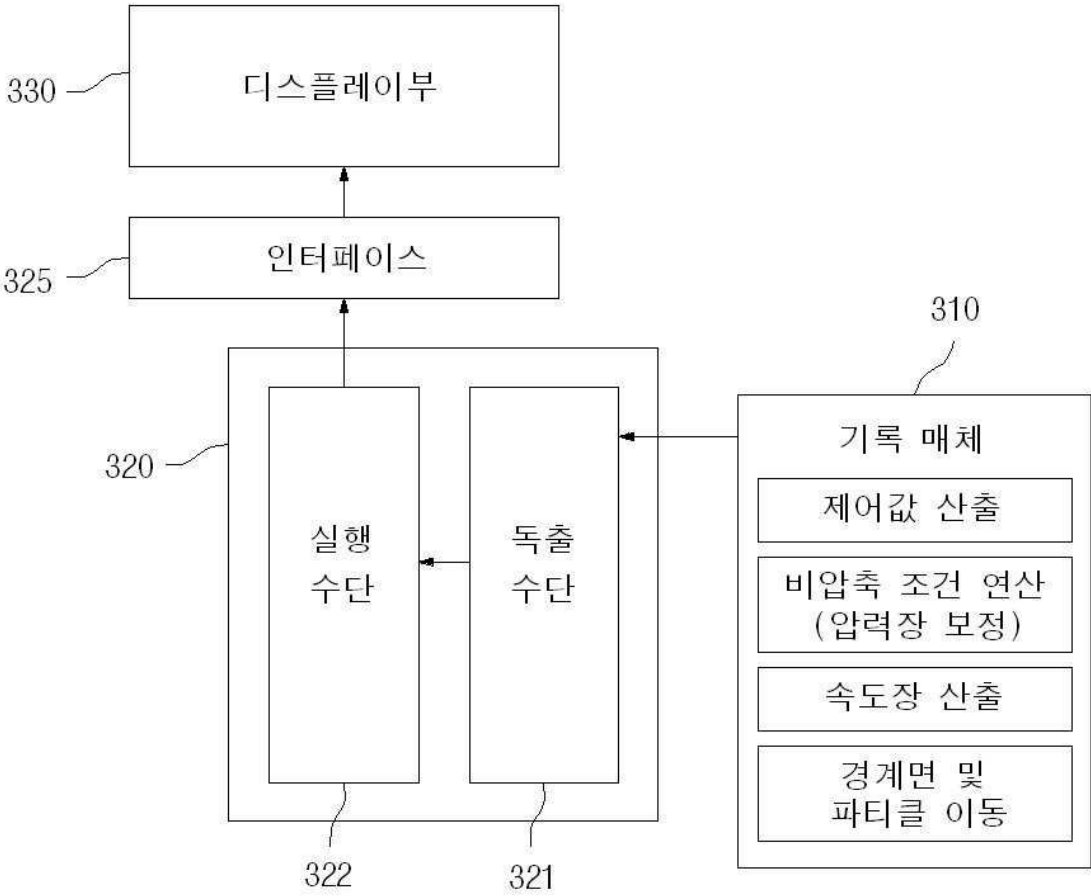
도면1b



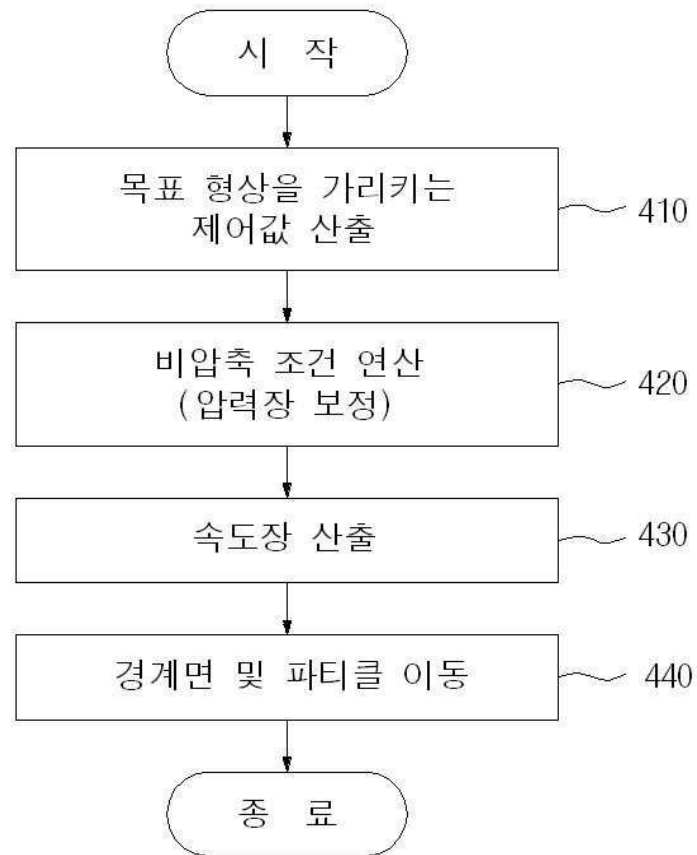
도면2



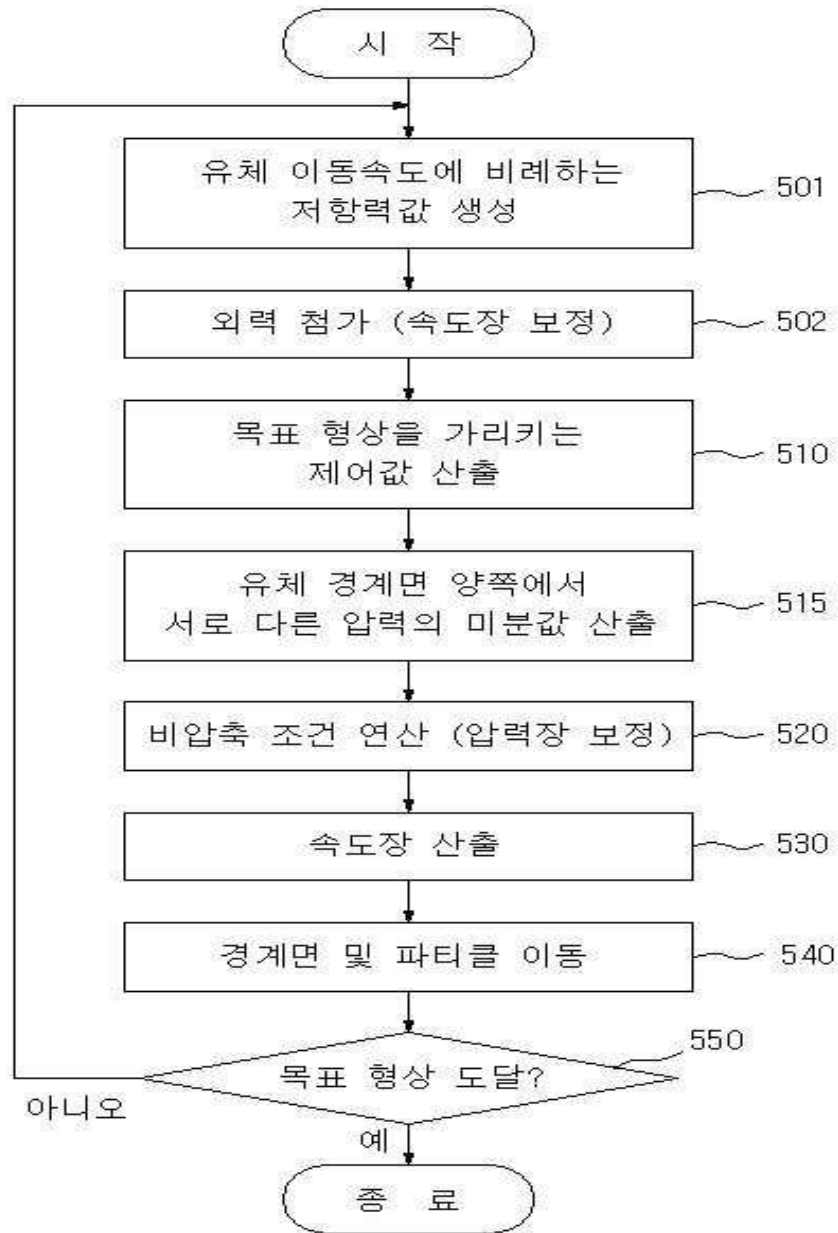
도면3



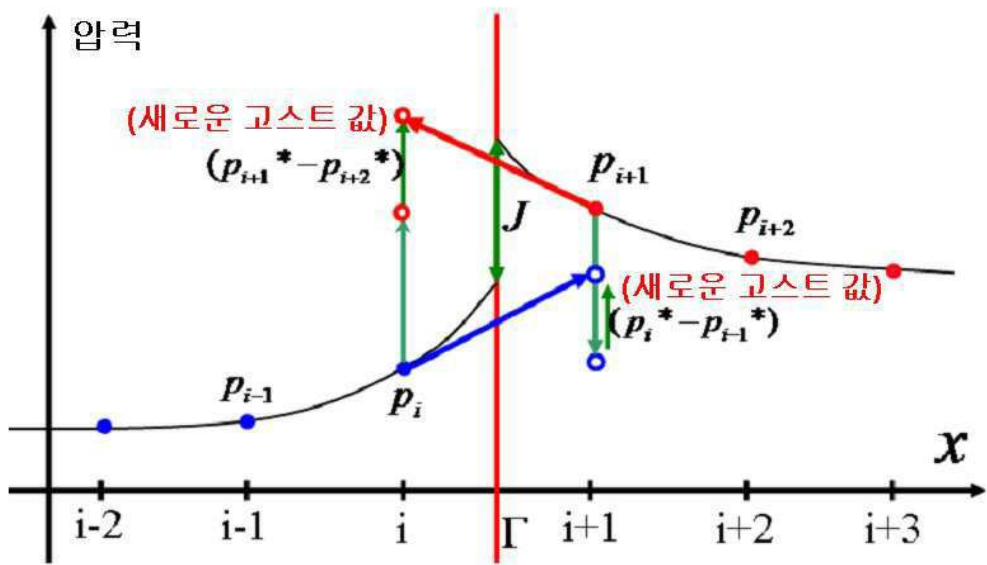
도면4



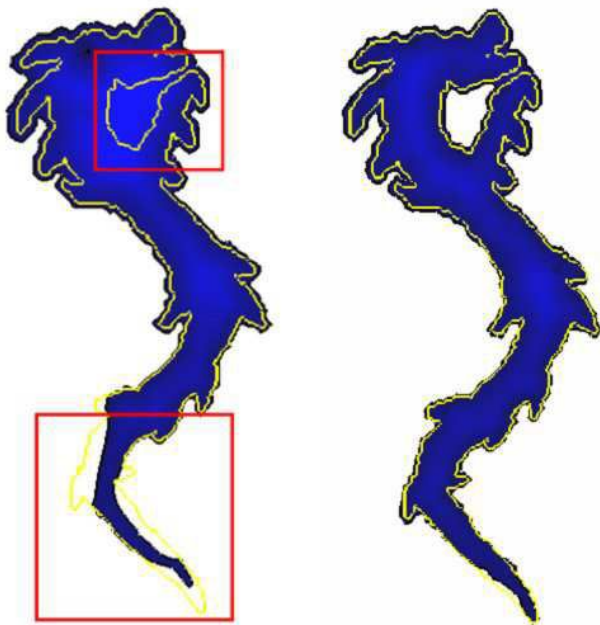
도면5



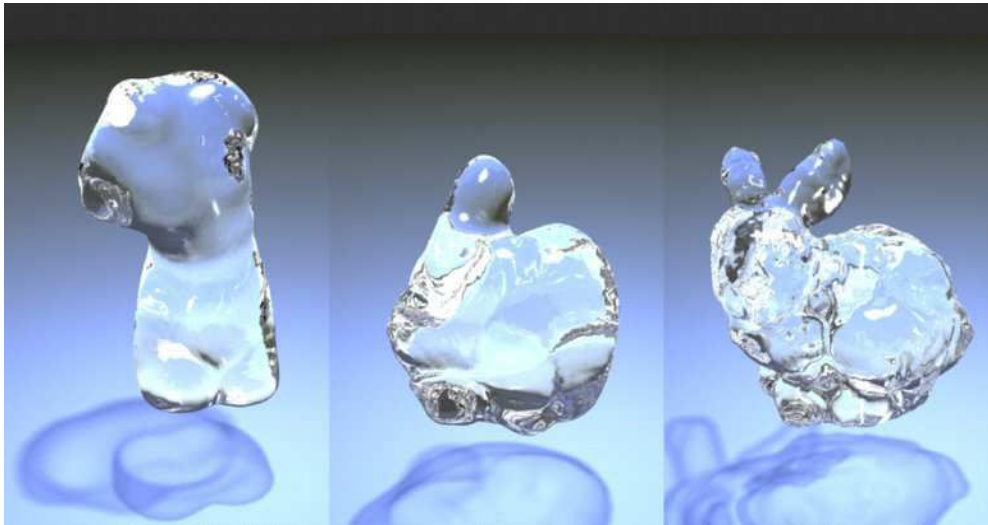
도면7



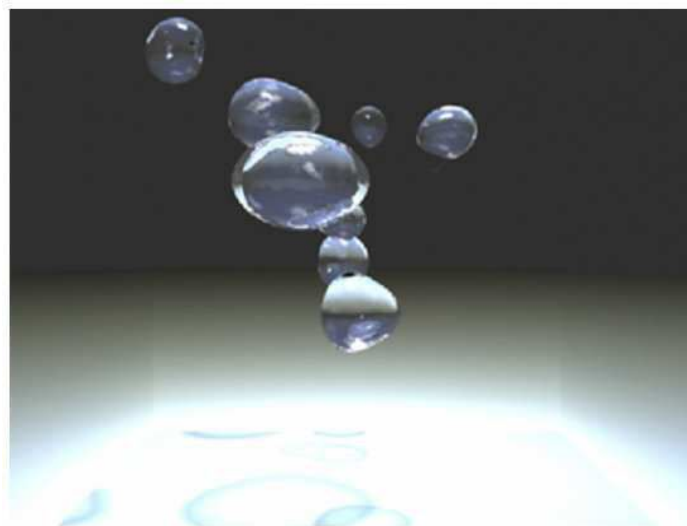
도면8



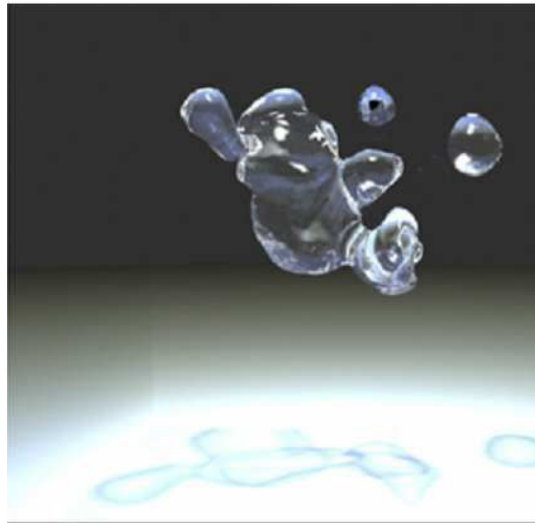
도면9



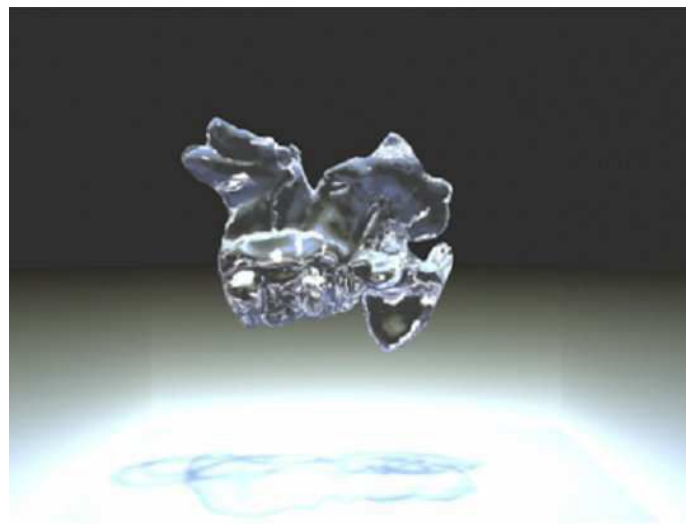
도면10a



도면10b



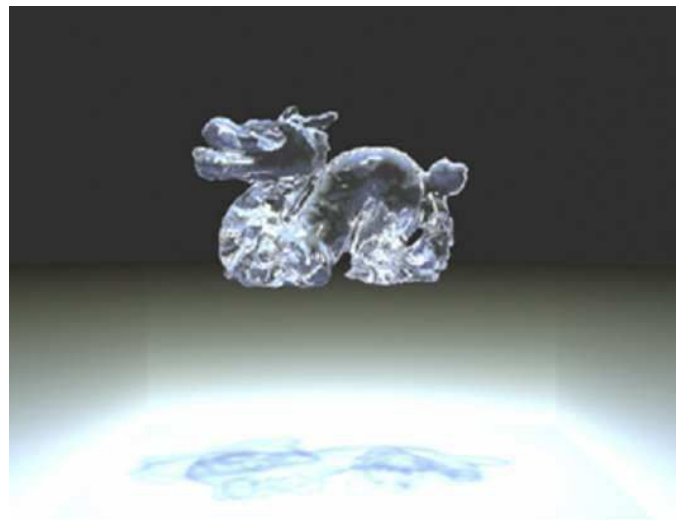
도면10c



도면10d



도면10e



도면10f

