



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2016년05월13일
(11) 등록번호 10-1616930
(24) 등록일자 2016년04월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 9/455 (2006.01) G06T 15/00 (2006.01)
G06T 19/00 (2011.01)
(52) CPC특허분류
G06F 9/455 (2013.01)
G06T 15/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0108174
(22) 출원일자 2015년07월30일
심사청구일자 2015년07월30일
(56) 선행기술조사문헌
KR100963114 B1
KR1020130097498 A
JP2015132490 A
임재호, '혼합 기법을 이용한 사실적인 얼음 생성 시뮬레이션', 고려대학교 석사학위 논문, 2012년.

(73) 특허권자
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
김창현
서울 동대문구 약령시로 25, 105동 703호 (제기동, 안암골벽산아파트)
차성덕
서울특별시 성북구 동소문로34길 24, 106동 710호(돈암동, 삼성아파트)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김등용, 김홍석

전체 청구항 수 : 총 10 항

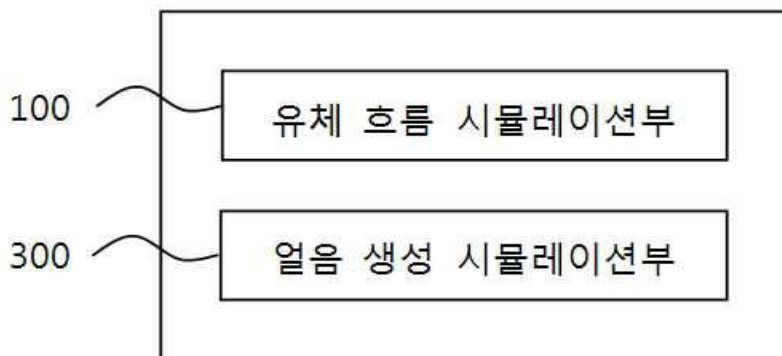
심사관 : 유진태

(54) 발명의 명칭 얼음 생성 시뮬레이션 장치 및 방법

(57) 요약

얼음 생성 시뮬레이션 장치가 개시된다. 상기 얼음 생성 시뮬레이션 장치는 소정의 입자 기반 유체 시뮬레이션 기법을 이용하여 유체의 흐름을 시뮬레이션하는 유체 흐름 시뮬레이션부 및 유체 입자들 각각의 상태 변화 여부를 결정하는 얼음 생성 시뮬레이션부를 포함하고, 상기 얼음 생성 시뮬레이션부는, 고체 입자들 각각과 얼음 입자들 각각의 습도를 결정하는 습도 결정부, 유체 입자의 이동 궤적에 기초하여 얼음의 성장 방향에 관한 정보를 포함하는 성장 방향 벡터를 결정하는 성장 방향 결정부, 및 상기 유체 입자들 각각의 상태 변화 여부를 결정하는 입자 상태 결정부를 포함한다.

대표도 - 도1



10

(52) CPC특허분류

G06T 19/00 (2013.01)

(72) 발명자

이정

서울 동대문구 외대역동로 14, 102동 803호 (회경
동, 회경센트레빌)

임재호

서울 송파구 한가람로 446, 101동 906호 (풍납동,
동아한가람아파트)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 C01907380100413705

부처명 중소기업청

연구관리전문기관 한국산업기술평가관리원

연구사업명 산학협력기술개발사업

연구과제명 FX원천기술과 3D 자막기술을 융합한 고품질 3D VFX 자막기술 개발

기 여 율 1/1

주관기관 고려대학교 산학협력단

연구기간 2014.06.01 ~ 2015.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

소정의 입자 기반 유체 시뮬레이션 기법을 이용하여 유체의 흐름을 시뮬레이션하는 유체 흐름 시뮬레이션부; 및
유체 입자들 각각의 상태 변화 여부를 결정하는 얼음 생성 시뮬레이션부를 포함하고,

상기 얼음 생성 시뮬레이션부는,

고체 입자들 각각과 얼음 입자들 각각의 습도를 결정하는 습도 결정부;

유체 입자의 이동 궤적에 기초하여 얼음의 성장 방향에 관한 정보를 포함하는 성장 방향 벡터를 결정하는 성장 방향 결정부; 및

상기 유체 입자들 각각의 상태 변화 여부를 결정하는 입자 상태 결정부를 포함하는 얼음 생성 시뮬레이션 장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 습도 결정부는 제1 수학식을 이용하여 상기 고체 입자들 각각과 상기 얼음 입자들 각각의 습도(H_{s_i})를 결정하고,

$$H_{s_i} = \alpha \sum_j m_j \eta W(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$$

상기 제1 수학식은 이고,

상기 p_{s_i} 는 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 위치이고,

상기 p_{f_j} 는 j번째 이웃 유체 입자(f_j)의 위치이고,

상기 m_j 는 상기 j번째 이웃 유체 입자(f_j)의 질량이고,

상기 $W(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$ 는 커널의 크기가 h 인 곡선 커널이고,

상기 α 는 퇴적 상수이고,

상기 η 는 상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 잔여 습도 수용력을 의미하는, 얼음 생성 시뮬레이션 장치.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 η 는 제2 수학식에 의해 정의되고,

$$\eta = 1 - \frac{H_{s_i}}{H_{MAX}}$$

상기 제2 수학식은 이고,

상기 H_{MAX} 는 상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 최대 습도를 의미하는, 얼음 생성 시뮬레이션 장치.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 성장 방향 결정부는,

상기 α 가 1인 경우 상기 성장 방향 벡터의 방향을 기류(airstream)의 방향으로 결정하고, 상기 α 가 0보다 크거나 같고 1보다 작은 경우 상기 성장 방향 벡터를 중력 방향으로 결정하는, 얼음 생성 시뮬레이션 장치.

청구항 5

제2항에 있어서,

상기 입자 상태 결정부는 제3 수학적식을 이용하여 상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 결합 계수(B_{s_i})를 결정하고,

상기 제3 수학적식은 $B_{s_i} = V_G \cdot V_N$ 이고,

상기 V_G 는 상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 상기 성장 방향 벡터를 의미하고,

상기 V_N 는 상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)로부터 상기 j번째 이웃 유체 입자(f_j)로의 방향을 지시하는 벡터를 의미하고,

상기 V_G 과 상기 V_N 은 단위 벡터이고,

상기 결합 계수(B_{s_i})는 [0, ..., 1]의 범위를 갖도록 정규화된 것을 특징으로 하는, 얼음 생성 시뮬레이션 장치.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 j번째 이웃 유체 입자(f_j)는 과냉각 상태(supercooled state)의 유체 입자인, 얼음 생성 시뮬레이션 장치.

청구항 7

제5항에 있어서,

상기 입자 상태 결정부는 제4 수학적식을 이용하여 상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 제1 결합력(F_{s_i})을 결정하고, 상기 제1 결합력(F_{s_i})과 제1 임계값을 비교하여 상기 j번째 이웃 유체 입자(f_j)의 상태를 결정하고,

상기 제4 수학적식은 $F_{s_i} = H_{s_i} B_{s_i} W(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$ 인, 얼음 생성 시뮬레이션 장치.

청구항 8

제5항에 있어서,

상기 입자 상태 결정부는 제5 수학적식을 이용하여 상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 제2 결합력(F_{s_i})을 결정하고, 상기 제2 결합력(F_{s_i})과 제2 임계값을 비교하여 상기 j번째 이웃 유체 입자(f_j)의 상태를 결정하고,

상기 제5 수학적식은
$$F_{s_i} = H_{s_i} B_{s_i} KW(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$$
 이고,

상기 K 는 상기 성장 방향 벡터와 이웃 고체 입자의 법선 벡터의 내적인, 얼음 생성 시뮬레이션 장치.

청구항 9

얼음 생성 시뮬레이션 장치에서 수행되는 얼음 생성 시뮬레이션 방법에 있어서,

소정의 입자 기반 유체 시뮬레이션 기법을 이용하여 유체의 흐름을 시뮬레이션하는 단계;

고체 입자들 각각과 얼음 입자들 각각의 습도를 결정하는 단계;

유체 입자의 이동 궤적에 기초하여 얼음의 성장 방향에 관한 정보를 포함하는 성장 방향 벡터를 결정하는 단계; 및

상기 유체 입자들 각각의 상태 변화 여부를 결정하는 단계를 포함하는, 얼음 생성 시뮬레이션 방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 습도를 결정하는 단계는 제1 수학적식을 이용하여 상기 고체 입자들 각각과 상기 얼음 입자들 각각의 습도(H_{s_i})를 결정하고,

상기 제1 수학적식은
$$H_{s_i} = \alpha \sum_j m_j \eta W(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$$
 이고,

상기 p_{s_i} 는 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 위치이고,

상기 p_{f_j} 는 j번째 이웃 유체 입자(f_j)의 위치이고,

상기 m_j 는 상기 j번째 이웃 유체 입자(f_j)의 질량이고,

상기 $W(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$ 는 커널의 크기가 h 인 곡선 커널이고,

상기 α 는 퇴적 상수이고,

상기 η 는 상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 잔여 습도 수용력을 의미하는, 얼음 생성 시뮬레이션 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명의 개념에 따른 실시 예는 얼음 생성 시뮬레이션 장치 및 방법에 관한 것으로, 특히 과냉각 상태의 흐르는 물로부터 얼음이 생성되고 성장하는 과정을 시뮬레이션할 수 있는 얼음 생성 시뮬레이션 장치 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 가상 환경에서 자연 현상을 재현하는 시뮬레이션 기술은 실제 자연 현상과 같은 모습을 구현하기 위해 지속적으로 연구되고 있다. 이를 위해 이미 검증된 물리 공식이나 자연 현상의 원리가 이용된다.
- [0003] 자연 현상 시뮬레이션은 다양한 분야에서 진행되고 있으며 대표적으로 물질이 고체에서 액체로, 액체에서 고체로 변화하는 것과 같은 상태 변화 시뮬레이션이 이에 해당한다.
- [0004] 특히, 상태 변화 시뮬레이션 중 물의 상태 변화를 다룬 연구는 매우 폭 넓게 진행되고 있다. 하지만, 대부분의 연구에서는 얼음이 물로 변화하고 물로 변화한 얼음이 어떤 식으로 움직이는가에 비중을 두어 연구가 진행되고 있으며, 물이 얼음으로 변화하는 과정은 거의 다루고 있지 않다.
- [0005] 일반적으로, 물은 섭씨 0℃에서 얼음으로 변화한다. 그러나, 계곡이나 폭포 등에서 빠르게 흐르는 과냉각 상태(supercooled state)의 물은 0℃ 이하의 온도임에도 불구하고 액체 상태(liquid state)를 유지하는 경향이 있다. 과냉각 상태의 물은 바위나 나뭇가지와 같은 물체의 표면에서 핵생성(nucleation) 이후에 결빙하기 시작한다. 얼음의 성장은 초기 핵생성에 의해 생성된 얼음과 과냉각 물 사이의 핵생성을 통하여 진행된다.
- [0006] 컴퓨터 그래픽 연구 분야에서, 얼음의 생성과 성장을 시뮬레이션하기 위한 다양한 방법이 소개되어 왔다.
- [0007] Stefan problem에 의해 정의된, 레벨셋 데이터(level set data)에 기초한 고드름 성장에 관한 연구는 상세한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나, 이와 같은 방법은 연산량이 많으며 흐르는 물과의 상호 작용하는 동안에 얼음의 성장을 시뮬레이션할 수는 없다. 게다가, 이와 같은 방법은 고드름을 생성하는데 제한적으로 이용될 수 있고, 물체의 표면에서 생성되는 아이스 글레이즈(ice glaze)를 시뮬레이션하기에는 적절하지 못하다.
- [0008] 이에 본 발명의 발명자는 얼음 생성(또는 성장) 시뮬레이션을 위한, 용이하고 신속하고 유연한 방법을 발명하기에 이르렀다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0009] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-1317202호
(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허 제10-1328739호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 본 발명이 이루고자 하는 기술적인 과제는 과냉각 상태의 흐르는 물이 얼음으로 변화하는 과정을 시뮬레이션할 수 있는 얼음 생성 시뮬레이션 장치 및 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0011] 본 발명의 실시 예에 따른 얼음 생성 시뮬레이션 장치는 소정의 입자 기반 유체 시뮬레이션 기법을 이용하여 유체의 흐름을 시뮬레이션하는 유체 흐름 시뮬레이션부 및 유체 입자들 각각의 상태 변화 여부를 결정하는 얼음 생성 시뮬레이션부를 포함하고, 상기 얼음 생성 시뮬레이션부는, 고체 입자들 각각과 얼음 입자들 각각의 습도를 결정하는 습도 결정부, 유체 입자의 이동 궤적에 기초하여 얼음의 성장 방향에 관한 정보를 포함하는 성장 방향 벡터를 결정하는 성장 방향 결정부, 및 상기 유체 입자들 각각의 상태 변화 여부를 결정하는 입자 상태 결정부를 포함한다.
- [0012] 또한, 본 발명의 실시 예에 따른 얼음 생성 시뮬레이션 방법은 얼음 생성 시뮬레이션 장치에서 수행되고, 는 얼

음 생성 시뮬레이션 방법에 있어서, 소정의 입자 기반 유체 시뮬레이션 기법을 이용하여 유체의 흐름을 시뮬레이션하는 단계, 고체 입자들 각각과 얼음 입자들 각각의 습도를 결정하는 단계, 유체 입자의 이동 궤적에 기초하여 얼음의 성장 방향에 관한 정보를 포함하는 성장 방향 벡터를 결정하는 단계, 및 상기 유체 입자들 각각의 상태 변화 여부를 결정하는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0013] 본 발명의 실시 예에 따른 얼음 생성 시뮬레이션 장치 및 방법은 과냉각 상태의 흐르는 물에서 얼음이 생성되는 과정을 간단하게 시뮬레이션할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0014] 본 발명의 상세한 설명에서 인용되는 도면을 보다 충분히 이해하기 위하여 각 도면의 상세한 설명이 제공된다.

도 1은 본 발명의 일 실시 예에 의한 얼음 생성 시뮬레이션 장치의 기능 블록도이다.

도 2는 도 1에 도시된 얼음 생성 시뮬레이션부를 도시한다.

도 3은 입자의 크기에 따른 이동 궤적을 도시한다.

도 4는 도 1에 도시된 얼음 생성 시뮬레이션 장치를 이용한 얼음 생성 시뮬레이션 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

도 5는 도 1에 도시된 얼음 생성 시뮬레이션 장치를 이용하여 시뮬레이션한 결과로서, 제2 임계값의 변화에 따른 상이한 결과를 도시한다.

도 6은 도 1에 도시된 얼음 생성 시뮬레이션 장치를 이용하여 시뮬레이션한 결과로서, 제1 임계값의 변화에 따른 상이한 결과를 도시한다.

도 7은 얼음이 유체 입자의 이동 방향으로 성장하는 건식 성장의 결과를 도시한다.

도 8은 습식 성장의 결과를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015] 본 명세서에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시 예들에 대해서 특정한 구조적 또는 기능적 설명은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시 예들을 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로서, 본 발명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 형태들로 실시될 수 있으며 본 명세서에 설명된 실시 예들에 한정되지 않는다.

[0016] 본 발명의 개념에 따른 실시 예들은 다양한 변경들을 가할 수 있고 여러 가지 형태들을 가질 수 있으므로 실시 예들을 도면에 예시하고 본 명세서에서 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 개념에 따른 실시 예들을 특정한 개시 형태들에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물, 또는 대체물을 포함한다.

[0017] 제1 또는 제2 등의 용어는 다양한 구성 요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성 요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소로부터 구별하는 목적으로만, 예컨대 본 발명의 개념에 따른 권리 범위로부터 벗어나지 않은 채, 제1 구성 요소는 제2 구성 요소로 명명될 수 있고 유사하게 제2 구성 요소는 제1 구성 요소로도 명명될 수 있다.

[0018] 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성 요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성 요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성 요소가 다른 구성 요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는 중간에 다른 구성 요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성 요소들 간의 관계를 설명하는 다른 표현들, 즉 "~사이에"와 "바로 ~사이에" 또는 "~에 이웃하는"과 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.

[0019] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로서, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 본 명세서에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성 요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구

성 요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

- [0020] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가진다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0021] 이하, 본 명세서에 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 실시 예들을 상세히 설명한다.
- [0022] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 의한 얼음 생성 시뮬레이션 장치의 기능 블록도이다.
- [0023] 도 1을 참조하면, 얼음 생성 시뮬레이션 장치(10)는 유체 흐름 시뮬레이션부(100)와 얼음 생성 시뮬레이션부(300)를 포함한다.
- [0024] 유체 흐름 시뮬레이션부(100)는 적어도 하나의 입자-기반 유체 시뮬레이션(particle-based fluid simulations) 기법을 이용하여 유체(예컨대, 물)의 흐름을 시뮬레이션할 수 있다.
- [0025] 일 예로, 유체 흐름 시뮬레이션부(100)는 3가지의 다른 입자-기반 유체 시뮬레이션 기법을 이용하여 유체의 흐름을 시뮬레이션할 수 있다. 구체적으로, 유체 흐름 시뮬레이션부(100)는 Macklin과 Müller에 의해 제안된 위치-기반 유체 기법(MACKLIN, M., AND MÜLLER, M. 2013. Position based fluids. ACM Trans. Graph. 32, 4 (July), 104:1-104:12.)을 이용하여 전체적인 유체의 흐름을 시뮬레이션할 수 있다. 또한, 유체 흐름 시뮬레이션부(100)는 Akinci 등이 제안한 밀도 보정 기법(AKINCI, N., IHMSEN, M., AKINCI, G., SOLENTHALER, B., AND TESCHNER, M. 2012. Versatile rigid-fluid coupling for incompressible sph. ACM Trans. GRAPH. 31, 4 (July), 62:1-62:8.)을 이용하여 터널링(tunneling)과 스틱킹(sticking) 문제를 해결할 수 있다. 또한, 유체 흐름 시뮬레이션부(100)는 Akinci 등이 제안한 기법(AKINCI, N., AKINCI, G., AND TESCHNER, M. 2013. Versatile surface tension and adhesion for sph fluids. ACM Trans. Graph. 32, 6 (Nov.), 182:1-182:8.)을 이용하여 표면 장력(surface tension)과 부착력(adhesion)을 시뮬레이션할 수 있다.
- [0026] 유체 흐름 시뮬레이션부(100)는 기존에 알려진 입자-기반 시뮬레이션 기법을 사용할 수 있으며, 실시 예에 따라 이용되는 기법은 상이할 수 있으므로, 이에 대한 상세한 설명은 생략하기로 한다.
- [0027] 요컨대, 유체 흐름 시뮬레이션부(100)는 기존에 알려진 유체 시뮬레이션 기법을 이용하여 유체의 흐름을 시뮬레이션할 수 있다. 즉, 유체 흐름 시뮬레이션부(100)는 기존에 알려진 유체 시뮬레이션 기법을 이용하여 유체를 구성하는 각 유체 입자(particle)의 물리량(예컨대, 속도, 가속도, 밀도, 위치 등)에 관한 정보를 연산하고 연산 결과를 출력할 수 있다.
- [0028] 얼음 생성 시뮬레이션부(300)는 유체 입자(또는 물 입자)의 상태 변화 여부를 결정할 수 있으며, 이에 대한 상세한 설명은 도 2를 통하여 서술하기로 한다.
- [0029] 도 2는 도 1에 도시된 얼음 생성 시뮬레이션부를 도시하고, 도 3은 입자의 크기에 따른 이동 궤적을 도시한다.
- [0030] 도 1 내지 도 3을 참조하면, 얼음 생성 시뮬레이션부(300)는 습도 결정부(310), 성장 방향 결정부(330), 및 입자 상태 결정부(350)를 포함한다. 실시 예에 따라, 얼음 생성 시뮬레이션부(300)는 렌더링부(미도시)를 더 포함할 수 있다.
- [0031] 습도 결정부(310)는 고체 물체(solid object)의 표면을 이루는 고체 입자(solid particle) 또는 얼음 입자(ice particle) 각각의 습도(humidity)를 계산할 수 있다.
- [0032] 일반적으로, 고체 물체의 표면에 흐르는 물은 수막(water film)을 형성한다. 상기 수막은 물체 또는 얼음이 젖은 상태를 유지하도록 하며, 얼음은 물체의 젖은 표면 또는 얼음의 젖은 표면상에서 생성되고 성장한다. 본 발명의 발명자는 얼음은 수막으로부터 생성되는 것이 아니고 고체 물체 또는 얼음의 젖은 표면상에서 생성되는 것을 관찰하였다. 젖은 표면은 결합력(crystallization force)을 통하여 얼음으로 성장한다고 볼 수 있다. 따라서, 고체 표면은 고체 입자(solid particle)로 이루어지고, 고체 입자 및/또는 얼음 입자 각각은 습도(humidity)를 갖는 것으로 가정할 수 있다.
- [0033] 고체 입자 또는 얼음 입자의 습도는 주변의 물 입자들의 영향을 받아 증가한다. 습도 결정부(310)은 아래의 수

학식 1을 이용하여 상기 고체 입자 또는 얼음 입자의 습도를 계산할 수 있다.

수학식 1

$$H_{s_i} = \alpha \sum_j m_j \eta W(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$$

상기 수학식 1에서, H_{s_i} 는 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)의 습도를 의미하고, f_j 는 j번째 이웃 유체 입자를 의미한다. 또한, p_{s_i} 와 p_{f_j} 는 각각 입자(s_i)와 입자(f_j)의 위치(position)을 의미하고, m_j 는 입자(f_j)의 질량을 의미한다. 함수 $W(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$ 는 범위(커널의 크기)가 h 인 곡선 커널(Smoothing Kernel)이라 불리며, 실시 예에 따라 SPH(Smoothed particle hydrodynamics) 커널 함수로 불릴 수도 있다.

α 는 퇴적 상수(accretion coefficient)로서 성장하는 얼음의 형태(shape)에 영향을 미친다. 퇴적 상수(α)는 $[0, \dots, 1]$ 범위의 값, 즉 0보다 크거나 같고 1보다 작거나 같은 실수(real number) 값을 갖는다. 이때, 퇴적 상수(α)가 1인 경우 건식 성장(dry growth)이라 하고, 퇴적 상수(α)가 1이 아닌 경우 습식 성장(wet growth)이라 할 수 있다.

η 는 입자(s_i)의 잔여 습도 수용력(또는 잔여 습도 수용력의 비율)을 의미하고, 아래의 수학식 2와 같이 정의될 수 있다.

수학식 2

$$\eta = 1 - \frac{H_{s_i}}{H_{MAX}}$$

상기 수학식 2에서, H_{MAX} 는 고체 입자 또는 얼음 입자(s_i)가 가질 수 있는 최대 습도를 의미한다. H_{MAX} 는 미리 정해진 값으로, 예컨대 100일 수 있다. η 의 값이 작아짐에 따라, 입자(s_i)는 더 적은 습도를 이웃 유체 입자들로부터 받게 된다.

성장 방향 결정부(330)는 얼음이 성장하는 방향에 관한 정보를 포함하는 성장 방향 벡터(growth direction vector; V_G)를 결정할 수 있다.

실제 자연 현상에서, 안개(mist), 물방울(droplet), 비(rain) 또는 흐르는 물(flowing water)등과 같은 다양한 종류의 유체는 입자의 크기와 입자의 이동 궤적(trajecory)에 따라 다양한 스타일의 얼음 형상을 생성한다.

빙하학(glaciology)에서, 공기 중에서 자유롭게 이동할 정도로 충분히 작은 입자들에 의한 얼음 성장을 건식 성장(dry growth)이라 부르고, 무리를 형성하여 흐를 수 있을 정도로 큰 입자들에 의한 얼음 성장을 습식 성장(wet growth)이라 부른다.

도 3에 도시된 바와 같이, 건식 성장에서의 입자들의 궤적은 기류(airstream)의 궤적과 동일시 될 수 있는 반면에, 습식 성장에서의 입자의 궤적은 중력과 물체와의 충돌에 따라 가시적인 흐름을 생성한다.

습식 성장과 건식 성장의 두 가지 경우 모두에서, 얼음의 성장 방향은 물 입자의 이동 궤적을 따른다. 따라서, 얼음 성장의 방향을 제어하기 위한 성장 방향 벡터를 물 입자의 흐름을 고려하여 정의할 수 있다. 즉, 습식 성장에서의 성장 방향 벡터의 방향은 중력의 방향과 동일시 될 수 있고, 건식 성장에서의 성장 방향 벡터의 방향

은 기류의 궤적과 동일시 될 수 있다.

[0045] 입자 상태 결정부(350)는 유체 입자들 각각의 상태를 결합력(crystallization force)에 기초하여 결정할 수 있다.

[0046] 물은 분자간의 힘(inter-molecular force)에 따라 기체(gas) 또는 고체(solid)로 변할 수 있다. 즉, 분자간의 힘이 강해짐에 따라 물 분자들은 점차적으로 느려지고 결국에는 고체로 변할 것이다. 일반적으로, 물이 흐르는 방향으로의 성장율은 다른 방향에 비해 크다. 본 발명에서 상기 분자간의 힘을 결합 계수(bond coefficient)로 명명하였다.

[0047] 입자(s_i)의 결합 계수(B_{s_i})는 수학식 3과 같이 성장 방향 벡터와 이웃 물 입자로의 방향을 지시하는 벡터의 내적(dot product)으로부터 구해질 수 있다.

수학식 3

[0048]
$$B_{s_i} = V_G \cdot V_N$$

[0049] 상기 수학식 3에서, V_G 는 입자(s_i)의 성장 방향 벡터를 의미하고, V_N 는 입자(s_i)로부터 과냉각된 이웃 물 입자(f_j)로의 방향을 지시하는 벡터를 의미한다. V_G 와 V_N 는 단위 벡터(unit vector)의 크기를 갖도록 정규화된 벡터일 수 있다. 또한, 수학식 3에 의한 결합 계수(B_{s_i})의 범위는 $[-1, \dots, 1]$ 이다. 결합 계수(B_{s_i})가 0 또는 0보다 큰 실수, 즉 $[0, \dots, 1]$ 의 범위를 갖도록 결합 계수(B_{s_i})를 정규화할 수 있다. 예컨대, 결합 계수(B_{s_i})에 1을 더하고 2로 나누어 주거나, 결합 계수(B_{s_i})를 2로 나누어준 후 0.5를 더함으로써 $[0, \dots, 1]$ 의 범위를 갖는 결합 계수, 즉 정규화된 결합 계수를 이용할 수 있다. 결국, 벡터(V_G), 즉 입자(s_i)에 근접하여 위치하는 물 입자와 관련하여 정규화된 결합 계수는 큰 값을 가지게 되고 얼음으로 상태가 변화할 가능성은 높아지게 된다.

[0050] 상술한 바와 같이, 건식 성장에서 성장 방향 벡터는 기류의 방향에 의존한다. 격자 기반 시뮬레이션 방법(grid-based simulation method)에서는 속도 필드(velocity field)를 이용하여 기류의 방향을 추정할 수 있다. 입자 기반 시뮬레이션 기법을 이용하는 본 발명에서는 사용자에게 의해 정의되는 속도 벡터를 이용함으로써 이러한 문제점을 해결할 수 있다.

[0051] 입자가 얼음으로 상태가 변화하는지 여부를 결정하는 결합력(crystallization force)은 수학식 4와 수학식 5를 이용하여 계산될 수 있다. 수학식 4의 경우, 얼음 입자의 결합력을 의미하는 제1 결합력이고, 수학식 5의 경우, 고체 입자의 결합력을 의미하는 제2 결합력이다.

수학식 4

[0052]
$$F_{s_i} = H_{s_i} B_{s_i} W(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$$

[0053] 얼음 입자(s_i) 주변에 위치하는 물 입자(f_j)는 제1 결합력(F_{s_i})이 제1 임계값(또는 고드름 생성 임계값)을 초과하거나 또는 상기 제1 임계값보다 크거나 같은 값을 가질 때 상태가 얼음으로 변한다. 상기 제1 임계값은 미리 정해진 값을 가질 수 있다.

[0054] 습식 성장에서, 결합력은 고드름과 고체 물체상의 글레이즈 두가지를 모두 생성한다. 그러나, 수학식 4에 의할

경우 과도한 글레이즈를 생성하게 될 수 있다. 따라서, 글레이즈의 양을 감소시키기 위해 결합력을 보정할 필요가 있다. 고체 입자(s_i)의 결합력인 제2 결합력은 아래의 수학적식 5에 의해 정의될 수 있다.

수학적식 5

$$F_{s_i} = H_{s_i} B_{s_i} KW(p_{s_i} - p_{f_j}, h)$$

[0055]

[0056]

상기 수학적식 5에서, K 는 제2 결합력을 보정하기 위한 보정 값으로서, 성장 방향 벡터와 이웃 고체 입자의 법선 벡터의 내적을 이용하여 계산될 수 있다. 또한, 상기 K 는 $[0, \dots, 1]$ 의 범위를 갖도록 정규화된 값일 수 있다.

[0057]

고체 입자(s_i) 주변에 위치하는 물 입자(f_j)는 제2 결합력(F_{s_i})이 제2 임계값(또는 글레이즈 생성 임계값)을 초과하거나 또는 상기 제2 임계값보다 크거나 같은 값을 가질 때 상태가 얼음으로 변한다. 상기 제2 임계값은 미리 정해진 값을 가질 수 있다.

[0058]

상술한 바와 같이, 입자 상태 결정부(350)는 얼음 입자 주위의 물 입자의 상태 변화 여부를 결정함으로써 고드름이 생성되는 과정을 시뮬레이션할 수 있고, 고체 입자 주위의 물 입자의 상태 변화 여부를 결정함으로써 글레이즈가 생성되는 과정을 시뮬레이션할 수 있다.

[0059]

또한, 도시되지 않은 렌더링부는 각 입자들의 상태에 따라 물과 얼음을 표현함으로써 렌더링할 수 있다.

[0060]

도 4는 도 1에 도시된 얼음 생성 시뮬레이션 장치를 이용한 얼음 생성 시뮬레이션 방법을 설명하기 위한 흐름도이다. 이하, 얼음 생성 시뮬레이션 방법을 설명함에 있어 중복되는 내용에 관한 기재는 생략하기로 한다.

[0061]

도 1 내지 도 4를 참조하면, 얼음 생성 시뮬레이션 장치(10)의 유체 흐름 시뮬레이션부(100)는 소정의 입자 기반 유체 시뮬레이션 기법을 이용하여 유체의 흐름을 시뮬레이션할 수 있다(S100).

[0062]

S300 단계에서, 얼음 생성 시뮬레이션 장치(10)의 습도 결정부(310)는 고체 입자들 각각과 얼음 입자들 각각의 습도를 결정할 수 있다.

[0063]

S500 단계에서, 얼음 생성 시뮬레이션 장치(10)의 성장 방향 결정부(330)는 유체의 이동 궤적에 기초하여 얼음의 성장 방향에 관한 정보를 포함하는 성장 방향 벡터를 결정할 수 있다.

[0064]

또한, 얼음 생성 시뮬레이션 장치(10)의 입자 상태 결정부(350)는 결합 계수를 결정하고(S700), 결정된 결합 계수를 이용하여 결합력을 결정하고(S800), 결정된 결합력에 기초하여 유체 입자의 상태, 즉 유체 입자의 상태 변화 여부를 결정할 수 있다(S900).

[0065]

상술한 내용을 미리 정해진 시간 단위별로 반복 수행함으로써, 전체 시뮬레이션을 완료할 수 있다.

[0066]

도 5는 도 1에 도시된 얼음 생성 시뮬레이션 장치를 이용하여 시뮬레이션한 결과로서, 제2 임계값의 변화에 따른 상이한 결과를 도시한다.

[0067]

시뮬레이션 과정에서, 퇴적 상수(α)와 고드름 생성 임계값, 즉 제1 임계값은 각각 0.5와 7.0으로 설정되었으며, 도 5의 글레이즈 생성 임계값(제2 임계값)은 각각 5.0(도 5의 (a)), 8.0(도 5의 (b)), 11.0(도 5의 (c))로 설정되었다.

[0068]

도 5를 살펴보면, 제2 임계값이 증가함에 따라 글레이즈의 성장이 제한적으로 발생함으로 알 수 있다. 보통 제2 임계값은 제1 임계값에 비해 크게 설정되나, 글레이즈의 생성을 보다 명확하게 보여주기 위하여 제2 임계값이 제1 임계값보다 더 작게 설정될 수도 있다.

[0069]

도 6은 도 1에 도시된 얼음 생성 시뮬레이션 장치를 이용하여 시뮬레이션한 결과로서, 제1 임계값의 변화에 따른 상이한 결과를 도시한다.

[0070]

시뮬레이션 과정에서, 퇴적 상수(α)와 제2 임계값, 즉 글레이즈 생성 임계값이 각각 0.5와 7.0으로 설정되었

으며, 도 6의 코드를 생성 임계값(제1 임계값)은 각각 2.0(도 6의 (a)), 4.0(도 6의 (b)), 6.0(도 6의 (c))로 설정되었다.

[0071] 도 6을 살펴보면, 제1 임계값이 너무 작은 경우 얼음 표면의 물이 얼음 물체의 끝에 도달하기 전에 얼음으로 변화하는 현상을 관찰할 수 있다.

[0072] 본 발명의 성능을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 실험은 표 1과 같은 시뮬레이션 환경에서 수행되었다.

표 1

[0073]	프로세서	3.4 GHz Intel(R) Core i7-3770 CPU
	메모리	16GB RAM
	그래픽 카드	Nvidia Geforce GTX 560 Ti

[0074] 또한, 빙결 과정을 시뮬레이션하기 위하여 Müller 등이 2003년에 제안한 Poly6 kernel of standard SPH 기법을 사용하였고, 얼음과 물표면을 $256 \times 256 \times 256$ 의 해상도로 재건하기 위하여 Lorensen과 Cline이 1987년에 제안한 마칭 큐브 알고리즘(marching cubes algorithm)을 사용하였다. 또한, Autodesk Maya 2014를 이용하여 렌더링하였다.

[0075] 도 7은 얼음이 유체 입자의 이동 방향으로 성장하는 건식 성장의 결과를 도시한다. 매 시뮬레이션 단계마다 생성되는 750 개의 물 입자와 99,038 개의 고체 입자를 사용하여 500 프레임을 생성하기 위하여, 마칭 큐브 과정을 포함한 전체 시뮬레이션에는 5분이 소요되었다.

[0076] 도 8은 습식 성장의 결과를 도시한다. 매 시뮬레이션 단계마다 쏟아지는 100 개의 물 입자와 10,242 개의 고체 입자를 사용하여 700 프레임을 생성하기 하는데 2 분이 소요되었다.

[0077] 상술한 바와 같이, 본 발명은 흐르는 과냉각 물에 적용 가능한 얼음 생성(또는 성장) 시뮬레이션 방법을 제시하고 있다. 본 발명은 간단하고 용이하게 구현가능하며, 다른 입자 기반 시뮬레이션 방법과 통합하여 사용될 수 있는 유연한 방법을 제공하고 있다.

[0078] 발명은 도면에 도시된 실시 예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시 예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 등록청구범위의 기술적 사상에 의해 정해져야 할 것이다.

부호의 설명

[0079] 10 : 얼음 생성 시뮬레이션 장치

100 : 유체 흐름 시뮬레이션부

300 : 얼음 생성 시뮬레이션부

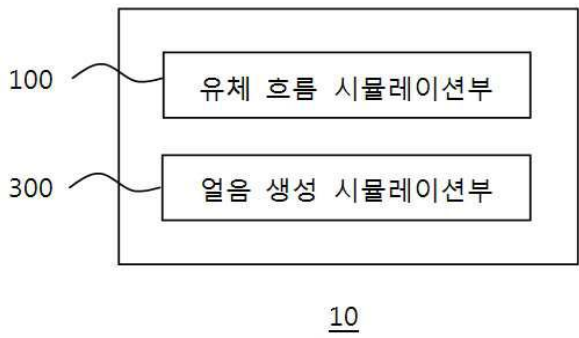
310 : 습도 결정부

330 : 성장 방향 결정부

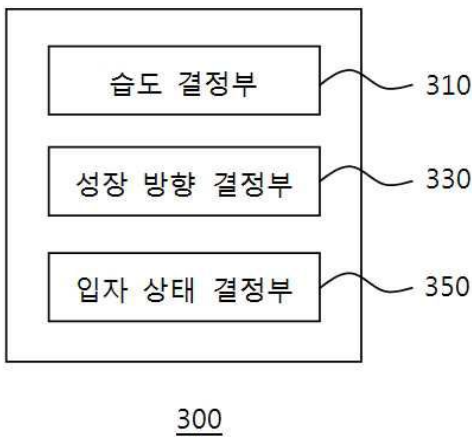
350 : 입자 상태 결정부

도면

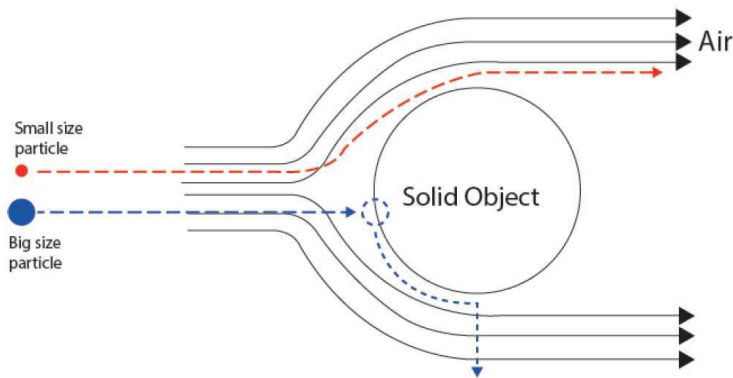
도면1



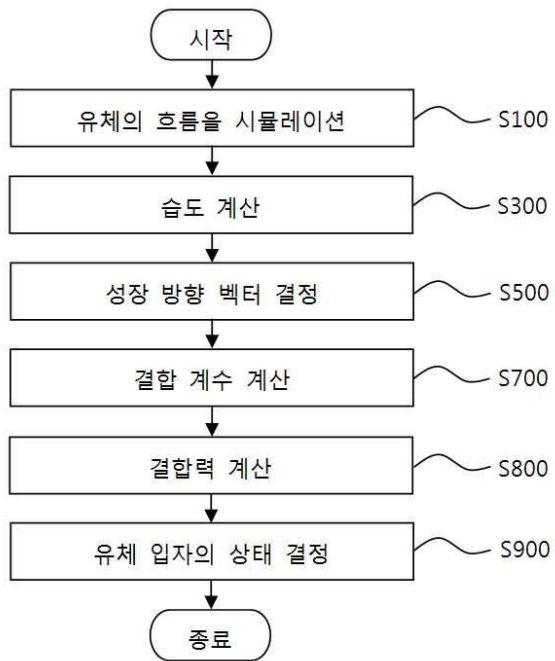
도면2



도면3



도면4



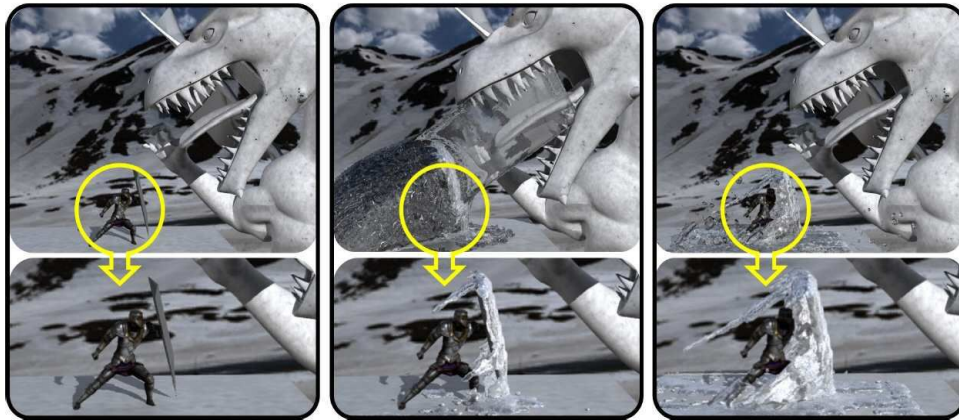
도면5



도면6



도면7



Ice growth in flowing water over time. Top: scene view. Bottom: zoom view without fluid

도면8



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 8

【변경전】

상기 i번째 고체 입자

【변경후】

상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자

【직권보정 2】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 7

【변경전】

상기 i번째 얼음 입자

【변경후】

상기 i번째 고체 입자 또는 얼음 입자