

파티클 기반 시뮬레이션 기술

한국전자통신연구원 | 표순형 · 최진성

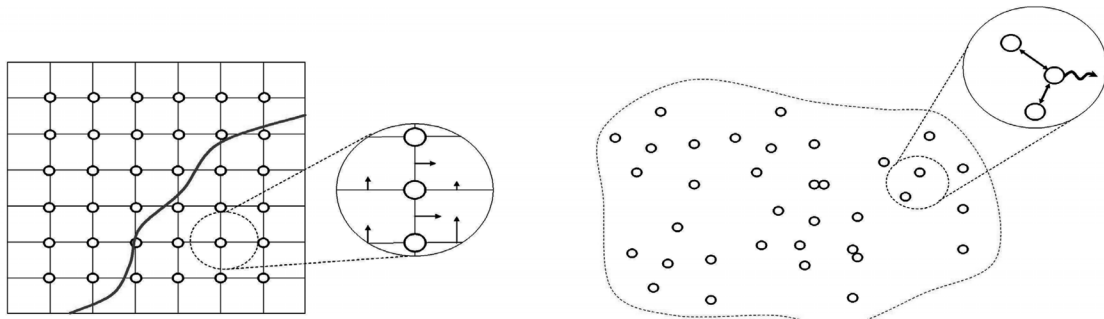
1. 서론

컴퓨터를 이용한 자연 현상의 재현은 오랜 기간 많은 분야의 주요 관심 대상이었으나 과도한 계산량으로 인해 기계/제조/항공 등 정밀한 시뮬레이션이 필수적으로 필요한 분야에 제한적으로 활용되어왔다. 컴퓨터 그래픽스 분야의 경우, 90년대까지는 시뮬레이션을 이용한 사실적인 물리 현상의 재현보다는 간단한 규칙 기반의 파티클 시스템 등을 이용해 자연 현상의 외형과 움직임을 모방하고자 하는 노력이 이어져오다가 [23,27,28], 2000년대에 들어 컴퓨팅 하드웨어의 발달과 함께 소프트웨어적인 시뮬레이션 가속 기법이 출현하면서[29] 본격적으로 물, 불과 같은 자연 현상이 영상 특수효과 제작에 사용되기 시작했다. 최근엔 그래픽 카드의 GPU(Graphics Processing Unit)를 활용한 하드웨어적인 가속 기술이 발달하면서 실시간에 사실적인 유체 시뮬레이션도 가능한 수준에 이르렀다.

컴퓨터 그래픽스 분야에서의 시뮬레이션 기술은 현실에 존재하는 물리적인 객체의 움직임을 컴퓨터를 이용해 시각적인 형태로 재현하고 이를 영상 콘텐츠 제작에 활용케 하는 일련의 기술을 말하며, 주로 사용자가 직접 제작하기 어려운 움직임이나 물리적인 계산을 통해 표현되었을 때 사실성을 느낄 수 있는 현상을 표현하기 위해 사용된다. 이러한 예로는 물체 간의 복잡

한 충돌, 옷감의 움직임, 머리카락의 표현, 유체의 흐름, 충격에 의해 깨어지는 물체 등 다양하다. 기존 시뮬레이션 기술이 물리적 사실성이나 정밀도 향상을 주요 목적으로 하는 것과는 달리, 영상 특수효과를 위한 시뮬레이션 기술은 영화, 애니메이션, 게임 등 콘텐츠에 나타나는 작가의 상상력을 뒷받침할 수 있어야 해서 물리적으로는 일부 옳지 않더라도 눈으로 보기에 문제가 안 될 정도의 사실성, 즉 시각적 사실성을 목적으로 한다는 점에서 차이가 있다.

컴퓨터를 이용한 시뮬레이션은 계산상의 편의를 위해 시뮬레이션이 이루어지는 공간 또는 시뮬레이션 되는 물질 자체를 작은 단위로 나누어 속도 등의 정보를 계산하게 되는데, 이 구성 요소 간에 미리 정의된 연결 관계가 있는 지 여부에 따라 그림 1과 같이 메쉬 기반(mesh-based) 방법 또는 메쉬 프리(mesh-free) 방법으로 나뉜다. 이 구성 요소가 시뮬레이션 과정에서 공간상에 고정되어 있으면 오일러(Eulerian) 방식, 시간의 흐름에 따라 이동하면 라그랑지안(Lagrangian) 방식으로 불린다. 유한차분법(Finite Difference Method)과 유한요소법(Finite Element Method)이 대표적인 메쉬 기반 방법으로 유체 역학 등의 다양한 분야에 사용되고 있다. 메쉬 기반 방법이 현재 가장 널리 사용되는 방식이기는 하지만 복잡한 물체를 균일한 메쉬로



(a) 메쉬 기반 방법

(b) 메쉬 프리 방법

그림 1 메쉬 기반 방법과 메쉬 프리 방법의 예

표현하기 어렵고 시뮬레이션 과정에서 물체가 이동하거나 물체 자체의 변형이 심하게 일어나는 경우 초기의 연결 관계를 유지하기 어렵다는 문제가 있다. 이런 문제를 해결하기 위한 방법으로 제안된 메쉬 프리 방법은 구성 요소 간에 미리 정의된 연결 관계없이 물질을 구성하는 요소들이 자유롭게 이동하도록 하고 이 구성 요소들로부터 보간(interpolation)을 통해 필요한 정보를 얻는 방식으로써 간략화된 입자 유체역학(Smoothed Particle Hydrodynamics)와 개별요소법(Discrete Element Method)이 대표적이다. 라그랑지안 방식으로 동작하는 메쉬 프리 방법은 시뮬레이션 되는 물질 자체에서만 계산이 이루어져 상대적으로 효율적이고 입자성을 띄는 세밀한 현상의 표현에 적합하다. 최근에는 이 두 가지 방법의 장점을 모두 활용하기 위한 연구도 진행되었다[10,30].

본 논문에서는 앞서 설명한 시뮬레이션 방법들 중에서 파티클을 이용해 시뮬레이션을 하는 간략화된 입자 유체역학 방법을 소개한다. 이후로는 간략화된 입자 유체역학을 SPH로 줄여서 칭한다. 2장에서는 SPH 기술의 원리를 설명하고 3장에서는 이를 이용한 그래픽스 분야의 시뮬레이션 기술 동향을 소개한 뒤, 4장에서 결론을 맺는다.

2. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)의 이해

SPH는 Gingold와 Monaghan[15] 그리고 독립적으로 Lucy[13]에 의해 천체의 움직임을 시뮬레이션하기 위한 방법으로 처음에 고안되었고 이후 유체 역학의 문제들을 해결하기 위한 방법으로 그 응용분야가 확대되었다. 주로 연속체를 시뮬레이션 하는데 사용되어 이름이 간략화된 입자 유체역학이라 불리지만, 근본적으로는 불규칙하게 위치한 일련의 지점(파티클)에 있는 값들로부터 이들을 대표하는 함수의 근사치를 구해 원하는 위치에서의 값을 얻는 방법으로 볼 수 있고, 파티클 사이에 주고받는 힘을 계산할 때 어떤 물리 법칙이 적용되느냐에 따라 그 응용이 달라진다.

2.1 SPH의 파티클 근사 방법

임의의 함수 $A(\mathbf{x})$ 가 일련의 샘플링 된 지점에서의 값으로 정의되어 있을 때, $A(\mathbf{x})$ 는 다음과 같이 두 함수의 합성 형태로 다시 쓰일 수 있다.

$$A(\mathbf{x}) = \int A(\mathbf{x}') \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}') dV$$

이 때, δ 는 Dirac-delta 함수를 의미한다. 이 형태의

함수는 이미 우리가 알고 있는 샘플 지점 \mathbf{x}' 에 대해서만 값을 알 수 있고 임의의 지점에서 값을 얻을 수 없으므로 Dirac-delta 함수를 부드러운 커널 함수 W 로 대체하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$A(\mathbf{x}) = \int A(\mathbf{x}') W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) dV$$

여기서 h 는 커널의 영향범위(support)를 나타낸다. 커널은 h 를 매개변수로 해서 각각의 샘플 위치가 어느 정도의 범위까지 영향을 미칠 지를 조절할 수 있게 한다. 커널 함수 W 는 목적에 맞게 고안되어 사용될 수 있는데, 일반적으로 부드러운 함수 $A(\mathbf{x})$ 를 재현하기 위해 다음의 몇 가지 성질을 만족시키도록 설계된다[12].

$$\int W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) dV = 1$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}', h) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}')$$

$$W(\mathbf{x} - \mathbf{x}') = 0, \text{ for } |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| > \kappa h$$

첫 번째 조건은 재현된 함수의 0차 연속성을 보장하여 부드러운 함수를 구성할 수 있게 하며, 두 번째 조건은 h 가 0에 근사할 때 Dirac-delta 함수와 같은 효과를 내어 계산된 근사된 값이 원래의 함수 값을 갖도록 하고, 마지막 조건은 h 에 스케일링 값 κ 를 곱한 범위를 벗어난 경우 W 의 값이 0이 되도록 해 제한된 범위 내에서만 영향력을 갖도록 한다. 보통 가우시안 분포를 근사하면서 유한한 영향 범위를 갖는 이차 연속 함수로 스플라인 기반의 커널을 많이 사용한다.

적분 형태로 표현된 원래 식을 다시 합산 형태의 식으로 근사를 하면

$$A(\mathbf{x}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h)$$

가 된다. 여기서 A_j , ρ_j 와 m_j 는 각각 \mathbf{x}_j 에서의 함수 A 의 값, 밀도, 그리고 질량을 의미한다. 합산은 그림 2와 같이 우리가 값을 얻고자 하는 지점 \mathbf{x} 로부터 h 의 상수배 범위 안에 있는 모든 다른 샘플 지점에 대해서 이루어진다. 이 방법을 사용하면 이웃한 샘플 지점에서의 값을 이용해 원하는 지점에서의 값을 계산할 수 있다. 예를 들면, 지점 \mathbf{x} 에서의 밀도 값은 다음의 식을 이용해 모든 지점에서 계산될 수 있다.

$$\rho(\mathbf{x}) = \sum_j m_j W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h)$$

이처럼 파티클로 대표되는 샘플 지점에 저장된 값을

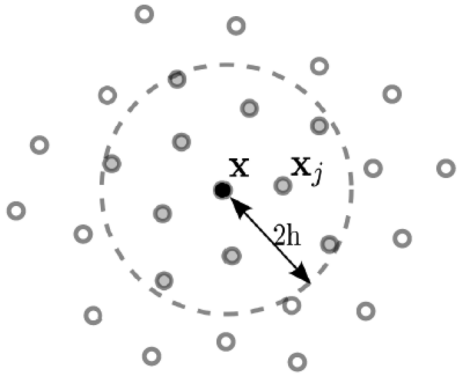


그림 2 커널 범위 내 파티클을 이용한 파티클 근사 방법

이용해 임의의 지점에서 원하는 값을 보간을 통해 계산해 내기 때문에 간략화된(smoothed) 입자(particle) 유체역학 이라 불리고 이러한 계산 방식을 파티클 근사 방법이라고도 한다.

이 방법의 몇 가지 유용한 점 중 하나는 주어진 함수 A 의 변화도(gradient)를 계산할 때 다음 식과 같이 커널 함수의 변화도를 이용해 계산할 수 있다는 점이다.

$$\nabla A(\mathbf{x}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h)$$

마찬가지로 라플라시안(Laplacian)이나 벡터 값을 갖는 함수의 다이버전스(divergence) 같은 선형 오퍼레이터도 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\Delta A(\mathbf{x}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \Delta W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A}(\mathbf{x}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla \cdot \mathbf{W}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j, h)$$

이러한 성질은 Navier-Stokes 방정식 등 물리 현상을 나타내는 미분방정식을 푸는데 유용하게 사용된다.

2.2 SPH를 이용한 유체 시뮬레이션

SPH는 기본적으로 연속성을 띄는 방정식을 근사하는 방법이므로 다양한 분야로 응용되어 사용될 수 있다. 시뮬레이션 되는 물질은 다수의 작은 파티클로 분할되어 표현되고, 각각의 파티클은 다른 이웃 파티클과의 상호작용에서 발생하는 힘에 반응하여 이동하게 된다. 이 때, SPH의 라그랑지안 성질에 따라 각 파티클은 모든 계산 정보를 지니고 복잡한 흐름을 따라 이동한다. 본 절에서는 가장 활발히 사용되는 분야인 유체 시뮬레이션을 예로 SPH의 응용 방법을 설명한다. Navier-Stokes 방정식으로 설명되는 유체의 움직임은

다음과 같이 SPH 형식으로 변환되어 적용된다.

• 연속성 방정식(Continuity Equation)

Monaghan[16]의 방법에 따라 유체의 연속성 방정식은 다음의 SPH 형식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b) \cdot \nabla W_{ab}$$

여기서 ρ_a 는 속도 \mathbf{v}_a 를 갖는 파티클 a 의 밀도이며 \mathbf{v}_b 와 m_b 는 각각 파티클 b 의 속도와 질량을 나타낸다. 파티클 b 로부터 파티클 a 까지의 위치 벡터를 $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$ 라고 할 때, $W_{ab} = W(\mathbf{r}_{ab}, h)$ 인 커널 함수를 나타낸다. 두 개의 파티클이 서로 접근하게 되면 둘 사이의 상대 속도가 음이 되고 커널의 변화도(gradient)도 음이 되면서 $\frac{d\rho_a}{dt}$ 를 증가 시키게 된다. 이 밀도의 변화율이 증가하면 파티클 a 의 밀도가 올라가면서 상대 파티클을 밀어내는 압력으로 작용한다. 반대로 파티클이 서로 멀어지게 되면 서로를 잡아당기는 힘이 발생한다. 이러한 속도, 밀도/압력의 상호작용이 평균적으로 파티클이 균일한 간격으로 유지되게 하고 밀도를 균일하게 하여 유체가 비압축성에 가까운 성질을 갖도록 한다.

• 운동량 방정식(Momentum Equation)

점성을 갖지 않는 유체의 경우 운동량 방정식의 SPH 형식은 다음과 같다.

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) \nabla W_{ab} + \mathbf{f}$$

여기서, P_a 는 파티클 a 의 압력을 의미하며 \mathbf{f} 는 중력과 같은 외부 힘을 의미한다. 점성을 갖는 경우는 압력 항이 있는 괄호 안에 각 파티클의 점성과 파티클 간의 상대속도, 상대 위치 등을 고려한 항이 추가된다. 압력 항은 Navier-Stokes 방정식에 있는 압력의 변화도 항에 해당하는 것으로 힘이 압력이 줄어드는 방향으로 일어나게 하는 역할을 한다.

• 상태 방정식(Equation of State)

파티클의 밀도와 유체의 압력 사이의 관계를 제공하는 상태 방정식은 다음과 같다.

$$P = P_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right]$$

여기서, P_0 는 압력의 크기이며, ρ_0 는 기준 밀도(reference density)이다. 물의 경우 $\gamma = 7$ 이 사용된다. 여기서 계

산되는 압력은 앞서 설명한 운동량 방정식에 적용되어 파티클의 움직임을 계산하는데 사용된다. 압력의 스케일 요소인 P_0 는 다음의 식으로 계산된다.

$$\frac{\gamma P_0}{\rho_0} = 100 V^2 = c_s^2$$

V 는 유체의 특성 또는 최대 속도를 의미하고, c_s 는 소리의 속도(speed of sound)이다. 현재 설명하는 SPH는 유체 자체의 속도보다 무척 큰 소리의 속도를 이용하도록 해 비압축성에 가까운 성질을 갖도록 하는 방식이다. 이러한 계산법은 밀도의 편차가 1% 미만인 유지 되도록 해서 유체가 비압축성에 가깝도록 한다.

시뮬레이션은 위에 설명한 연속성 방정식과 운동량 방정식을 시간의 흐름에 따라 파티클에 대해 계산하고 상태를 업데이트하면서 진행된다. 메쉬 기반 방법과 달리 미리 정의된 격자에 대한 의존성도 없고 파티클의 위치만이 이 방법에서 사용되는 유일한 기하학적인 요소이다. 커널 자체가 유한한 영향 범위를 가지므로, 각 방정식에 나타나는 합산 항목의 경우 현재 파티클의 주변에 있는 파티클만을 참조하여 계산하면 된다. 본 절에서는 유체의 경우에 대해서만 자세한 설명을 하였지만, SPH는 강체든 변형체든 파티클 사이에 주고받는 물리적인 힘의 정의에 따라 다양한 현상을 표현할 수 있다. 다음 절에서는 SPH를 이용한 연구 사례들을 살펴본다.

3. 연구 동향

컴퓨터 그래픽스 분야에서 가장 표현하기 어려운 대상으로 여겨지던 유체의 표현을 위해 시뮬레이션이 본격적으로 활용되기 시작한 것은 1999년에 Stam이 메쉬 기반 시뮬레이션 방식의 속도를 획기적으로 올릴 수 있는 역추적(back-tracing) 방법을 제안하면서부터이다[29]. 이후 2001년에 Foster 등이 이를 기반으로 레벨셋(level-set) 방법을 이용한 부드러운 수면 추적 방법을 제안하면서[21] 유체 시뮬레이션 기술은 메쉬 기반 방식의 시뮬레이션이 주류를 이루며 큰 관심을 받게 되었고, 시뮬레이션 기술은 하드웨어 및 소프트웨어적으로 시뮬레이션의 속도를 향상 시켜 사실성을 높이거나 작업 속도를 높이는 방향, 시뮬레이션 시 사용자의 조정 가능성을 높여 직접적인 연출이 가능하게 하는 방향, 그리고 표현할 수 있는 현상의 범위를 확대시키는 방향으로 연구가 현재까지 이어져 오고 있다.

SPH는 1996년에 Desbrun이 SPH 기법을 다양한 점

성과 강성도를 갖는 비탄력적(inelastic) 물질의 시뮬레이션에 적용하면서 컴퓨터 그래픽스 분야에 처음으로 소개되었다[6]. Desbrun은 SPH 기본 개념을 소개하며 응용 목적에 맞추어 파티클의 군집 현상 해소하기 위해 새로운 커널 함수를 제시하였고 파티클로부터 부드러운 표면을 얻는 방법, 빠른 이웃 파티클 검색 등 그래픽스 분야에서 고려해야 할 기본적인 요소들에 대해서도 다루었다. 이후 파티클 기반의 시뮬레이션 기술도 메쉬 기반 시뮬레이션 기술의 대안으로 계속 연구가 이루어졌는데, 2003년 Muller 등은 Desbrun의 논문을 이어 SPH를 기반으로 Navier-Stokes 방정식에 표면장력 효과를 적용해 자유 수면을 갖는 유체를 인터랙티브하게 시뮬레이션 할 수 있는 방법을 제안하였다[17]. Muller는 이어서 파티클 방식의 시뮬레이션 기술에 연속체 역학(continuum mechanics)을 적용하여 물리적인 사실성을 바탕으로 볼륨 형태 물질이 고무처럼 늘어나고, 굳고, 열에 의해 녹는 현상을 시뮬레이션 하는 방법을 제안하였다[18]. 이러한 현상의 물리적 힘을 계산하기 위해서는 탄성력 계산을 위해 각 파티클의 공간상 변위차를 계산할 필요가 있는데, Muller는 이동최소자승법(moving least square)을 사용하였다. 2005년에는 SPH를 기반으로 서로 다른 성질의 유체 간 상호작용을 시뮬레이션 하는 방법을 제안하면서 공기를 유체로 표현하여 물속에서 발생하는 기포를 표현하기도 하였다[19]. 액체 내에서 발생하는 기포와 관련해서는 2007년 Cleary 등이 파티클 자체에 가스를 심어 두고 파티클 간의 상호작용 시 확산을 통해 가스가 이동되도록 하고 충분한 가스가 모이는 시점에 공기를 발생시켜 맥주 거품과 같은 효과를 내는 방법을 제안하기도 하였다[5]. 같은 해에 Solenthaler 등은 Muller의 2004년 논문을 확장하는 가운데 이동최소자승법을 SPH 형식으로 대체하여 파티클로 구성된 물질이 탄성을 갖기도 하고 열에 의해 녹아서 분리되거나 다시 냉각을 통해 이어 붙는 등 다양한 현상을 표현할 수 있는 통합화된 파티클 기반 시뮬레이션 방법을 제안하였다[25]. 2009년에는 다시 각 파티클에 대한 변위차를 계산하는 방법으로 이웃 파티클에서의 affine 변환을 계산한 후 이를 합성하여 파티클 주변에서의 변위차를 계산하는 좀 더 간단한 방법이 Gerszewski에 의해 제안 되었기[7], 기존 방법들이 탄성력 계산 시 단순히 상대적인 변위만을 고려하여 물체의 회전이 물체를 변형시키는 힘으로 판단되어 상실되는 문제를 해결하기 위해 Becker 등은 shape matching 기법에서 사용하는 co-rotation matrix를 SPH에 도입하여 물체의 회전도 안

전히 처리될 수 있도록 하였다[4]. 이후 SPH를 이용한 시물레이션 기술은 기본적인 틀은 유지하면서 새로운 응용 분야나 현상에 적용되어 해당 분야에 맞도록 개선되는 방향으로 연구가 진행되었고[2,24], 최근에는 SPH 방법 자체의 불완전한 비압축성을 개선하기 위한 연구들도 이루어지고 있다[3,11,26].

하드웨어의 발전과 더불어 파티클 기반의 시물레이션의 속도를 높이기 위한 연구도 진행되었는데, 소프트웨어적인 방법으로는 2007년 Bart Adams 등이 제안한 방법으로, 기하학적인 지역 특징과 시각적인 중요도를 고려하여 파티클의 크기를 달리함으로써 복잡하고 중요한 지역에서만 시물레이션의 세밀도를 높이는 방법이 있다[1]. 이 방법은 계산 가능한 리소스를 표면에 집중하여 더 높은 품질의 결과를 얻을 수도 있지만, 시물레이션 되는 유체의 내부를 표면에 비해 성가게 시물레이션 되도록 함으로써 동일한 품질의 결과에 대해 더 적은 수의 파티클을 사용할 수 있다는 장점도 있다. 유체의 움직임에 따라 지역적인 복잡도가 바뀌므로 동적으로 파티클을 더 작게 작르거나 크게 합치는 일이 반복되는데, Orthmann 등은 이 과정에서 에너지를 최소화하기 위해 분할/합침 사이에 시간적인 간격을 두고 블렌딩을 하는 방법을 제안하였다[22]. GPU를 활용하는 하드웨어적인 방법으로는, 2007년에 이웃 파티클 검색을 위한 버킷리스트, 밀도, 위치, 속도 정보를 텍스처 메모리로 맵핑하여 GPU 상에서 병렬처리가 가능하도록 한 Harada 등의 논문이 있었다[9]. 이후 2010년에는 Goswami 등이 GPU를 활용하여 인터랙티브하게 SPH 시물레이션과 렌더링을 병행하는 방법을 제안하였다[8]. 이들은 SPH를 이용한 시물레이션 시 가장 많은 시간을 차지하는 이웃 파티클 검색 시간을 Z-인덱싱과 병렬 정렬을 통해 해결함으로써 계산 시간을 줄이고 동시에 메모리 오버헤드도 해소하였다. 이후 많은 논문들이 GPU를 기반으로 구현되어 발표되고 있으며 현재는 실시간에 시물레이션이 가능한 수준에 이르렀다. SPH의 기본을 유지하면서 가속하는 방법과는 별개로, 2007년 Muller 등은 기존 방법들이 파티클에 가해지는 힘을 계산하고 이로부터 속도, 위치를 계산하는 힘 기반(force-based) 방식인 것과는 달리, 현재 위치에서의 충격(impulse)과 제약조건(constraint)으로부터 속도를 계산하는 위치 기반(position-based) 방식의 시물레이션 기법을 제안하였다[20]. 이 방법은 위치를 기반으로 하여 시물레이션 중에 물체를 직접 제어할 수 있다는 장점과 힘 기반 방식에서 발생하는 여러 불안정한 문제들을 해소할 수 있다는 장점이 있다.

이 방법은 이후 Macklin 등에 의해 실시간 유체 시물레이션 방법으로 확장되었다[14].

파티클을 이용한 시물레이션 기술은 오랜 역사를 지닌 메쉬 기반 방식에 비해 상대적으로 많은 연구가 이루어지지 않는 않지만, 개념이 직관적이고 구현이 용이하여 RealFlow나 Maya, Houdini 같은 상용 그래픽 소프트웨어에 도입되어 실제 콘텐츠 제작에 활용되고 있다. 더불어 기존에 사용하던 메쉬 기반 방식의 시물레이션에 파티클 기반의 시물레이션 방식을 접목하여 표현력을 증대시키고자 하는 요구가 있어 관련 연구들도 진행되고 있다[10,30]. 메쉬 기반 방식의 시물레이션과 파티클 방식의 시물레이션 기술은 경쟁적인 관계보다는 향후 상호 보완적인 관계로 발달, 융합될 것으로 보인다.

4. 결론

하드웨어의 발달과 함께 실시간 시물레이션이 가능해지고 이들의 영상 콘텐츠 제작이 본격화 되면서 영화, 애니메이션, 게임에서는 다양한 자연 현상이 필수적인 요소로 등장하고 있다. 시물레이션 기술은 그동안 수작업으로 제작하기 어려웠던 여러 현상을 재현 가능하게 하여 우리가 접하는 콘텐츠의 질적 향상을 가져다주는 역할을 충실히 수행하고 있다.

본고에서는 이러한 시물레이션 기술 중 파티클을 기반으로 한 시물레이션 방법을 설명하였다. 시물레이션의 방법적 구분을 설명하고, 파티클 기반 시물레이션의 주요 기술인 간략화된 입자 유체역학(SPH) 기술의 이론적인 배경을 설명한 뒤, 기존 논문들에서 다루고 있는 기술들을 살펴보고 기술의 발전 추이와 앞으로의 방향에 대해 살펴보았다.

그동안은 유체, 변형체의 시물레이션이 기술의 큰 축을 이루며 진행되어 왔고 어느 정도 포화 상태에 이르렀으나 기술의 물리적인 완성도 향상, 사용자 측면에서의 사용 편의성 개선, 미처 다루어지지 못했던 새로운 현상에 대한 연구, 게임 제작을 위한 실시간성 향상 등 아직 다루어야 할 주제들이 남아 있고, 아직도 연구는 계속 진행되고 있다. 기존 기술에 대한 이해를 통해 기술의 흐름을 파악하고 향후 새로운 기술 개발을 선도하는데 도움이 되었기를 바란다.

참고문헌

- [1] B. Adams, M. Pauly, R. Keiser, and L. J. Guibas, "Adaptively sampled particle fluids," ACM Transactions on

-
- Graphics, v.26, n.3, July 2007.
- [2] I. Alduán and M. A. Otaduy, “SPH granular flow with friction and cohesion,” in Proceedings of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, August 2011.
- [3] N. Akinci, M. Ihmsen, G. Akinci, B. Solenthaler and M. Teschner, “Versatile rigid-fluid coupling for incompressible SPH,” ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH), v.31, n.4, pp. 62:1-62:8, 2012.
- [4] M. Becker, M. Ihmsen, and M. Teschner, “Corotated SPH for deformable solids,” in Proceedings of the Fifth Eurographics conference on Natural Phenomena (NPH '09), pp.27-34, 2009.
- [5] P. W. Cleary, S. H. Pyo, M. Prakash, and B. K. Koo, “Bubbling and frothing liquids,” ACM Transactions on Graphics, v.26, n.3, July 2007.
- [6] M. Desbrun and M.-P. Gascuel, “Smoothed particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies,” in Proceedings of the Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation '96, pp.61-76, 1996.
- [7] D. Gerszewski, H. Bhattacharya, and A. W. Bargteil, “A point-based method for animating elastoplastic solids,” in Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 133-138, 2009.
- [8] P. Goswami, P. Schlegel, B. Solenthaler and R. Pajarola, “Interactive SPH simulation and rendering on the GPU,” in Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, July 2010.
- [9] T. Harada, S. Koshizuka, and Y. Kawaguchi, “Smoothed particle hydrodynamics on GPUs,” in Proceedings Computer Graphics International(2007), pp.63-70, 2007.
- [10] J. Hong, H.-Y. Lee, J.-C. Yoon, and C.-H. Kim, “Bubbles alive,” ACM Transactions on Graphics, v.27, n.3, August 2008.
- [11] M. Ihmsen, J. Cornelis, B. Solenthaler, C. Horvath and Matthias Teschner, “Implicit incompressible SPH,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, July, 2013.
- [12] G. R. Liu and M. B. Liu, “Smoothed particle hydrodynamics: A meshfree particle method,” World Scientific: Singapore, 2007.
- [13] L. Lucy, “A numerical approach to the testing of the fission hypothesis,” Astron. J., v.82, pp.1013-1024, Dec 1977.
- [14] M. Macklin and M. Müller, “Position based fluids,” ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2013), v.32, n.4, 2013.
- [15] R. A. Gingold and J. J. Monaghan, “Smoothed particle hydrodynamics - theory and application to non-spherical stars,” Mon. Not. Roy. Astron. Soc., v.181, pp.375-389, Nov 1977.
- [16] J. J. Monaghan, “Simulating free surface flows with SPH,” J. Comput. Phys., v.110, n.2, pp.543-574, 1992.
- [17] M. Muller, D. Charypar, and M. Gross, “Particle-based fluid simulation for interactive applications,” in Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, pp.154-159, 2003.
- [18] M. Müller, R. Keiser, A. Nealen, M. Pauly, M. Gross, and M. Alexa, “Point based animation of elastic, plastic and melting objects,” in Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pp.141-151, 2004.
- [19] M. Müller, B. Solenthaler, R. Keiser, and M. Gross, “Particle-based fluid-fluid interaction,” in Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pp.237-244, 2005.
- [20] M. Muller, B. Heidelberger, M. Hennix, and J. Ratcliff. “Position based dynamics,” J. Vis. Comun. Image Represent. v.18, n.2, pp.109-118, 2007.
- [21] N. Foster and R. Fedkiw, “Practical animation of liquids,” in Proceedings of SIGGRAPH 2001, pp.15-22, 2001.
- [22] J. Orthmann and A. Kolb, “Temporal blending for adaptive SPH,” Computer Graphics Forum, v.31 n.8, pp. 2436-2449, December 2012
- [23] W. T. Reeves, “Particle system - A technique for modeling a class of fuzzy objects,” in Proceedings of SIGGRAPH '83, pp.359-376, July 1983.
- [24] X. Shao, Z. Zhou, and W. Wu, “Particle-based simulation of bubbles in water-solid interaction,” Comput. Animat. Virtual Worlds v.23, n.5, Sept. 2012.
- [25] B. Solenthaler, J. Schläfli and R. Pajarola, “A unified particle model for fluid-solid interactions,” Comput. Animat. Virtual Worlds, v.18, n.1 pp.69-82, Feb. 2007.
- [26] B. Solenthaler, R. Pajarola, “Predictive-corrective incompressible SPH,” ACM Transactions on Graphics (TOG), v.28, n.3, August 2009
- [27] J. Stam and E. Fiume, “Turbulent wind fields for ga-
-

seous phenomena,” in Proceedings of SIGGRAPH ‘93, pp.369-376, Aug. 1993.

- [28] J. Stam and E. Fiume, “Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes,” in Proceedings of SIGGRAPH ‘95, pp. 129-136, 1995
- [29] J. Stam, “Stable fluids,” in Proceedings of SIGGRAPH ‘99, pp.121-128, 1999.
- [30] C. Wang, Q. Zhang, F. Kong and H. Qin, “Hybrid particle-grid fluid animation with enhanced details,” The Visual Computer, v.29, n.9, pp.937-947, September 2013.

약 력



표 순 형

2013 서울대학교 컴퓨터공학(박사)
2001~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원
2005~2008 호주 CSIRO 연구소 방문연구원
관심분야: 컴퓨터그래픽스, 물리기반애니메이션,
의료영상, 3D프린팅
E-mail : shpyo@etri.re.kr



최 진 성

2001~현재 한국전자통신연구원(ETRI) 책임연구원
2010~2011 뉴질랜드 HITLab, Canterbury 대학
방문연구원
관심분야: 컴퓨터그래픽스, 3D복원, 가상현실, HCI
E-mail : jin1025@etri.re.kr