한국컴퓨터그래픽스학회
Korea Computer Graphics Society Vol. 24, No. 2, P.11~20

액체 시뮬레이션의 얇은 특징을 빠르게 표현하기 위한 CPU와 GPU 이기종 컴퓨팅 기술

김종현*

강남대학교

jonghyunkim@kangnam.ac.kr

A CPU and GPU Heterogeneous Computing Techniques for Fast Representation of Thin Features in Liquid Simulations

Jong-Hyun Kim*

Kangnam University

요 약

우리는 유체의 얇은 막을 명시적으로 표현하고 보존할 수 있는 CPU–GPU 이기종 컴퓨팅 기반의 유체 시뮬레이션 기법을 소개한다. 본 논문에서 가장 큰 기여는 얇은 유체표면에서 쪼개지거나 밀도가 높은 지점에서 붕괴되어 유체표면에 나타나는 Hole을 방지하는 입자 기반 프레임워크를 GPU를 활용한다는 것이다. 유체표면을 추적하는 기존의 방법과는 달리, 제안된 프레임워크는 CPU–GPU 프레임워크상에서 수치적 확산이나 꼬임문제 없이 안정적으로 토폴로지 변화를 처리할 수 있다. 얇은 표면의 특징은 이방성 커널(Anisotropic kernel)과 주성분 분석(Principal component analysis; PCA)을 GPU상에서 수행하여 유체의 방향성을 빠르게 찾고, 새로운 유체입자의 위치를 결정하기 위해 계산하는, 후보위치 추출 과정의 효율성을 CPU–GPU 이기종 컴퓨팅 기술 기반으로 빠르게 계산한다. 제안된 알고리즘은 직관적으로 구현되며, 병렬화가 쉽고 시각적으로 디테일한 액체의 얇은 표면을 빠르게 애니메이션 할 수 있다.

Abstract

We propose a new method particle-based method that explicitly preserves thin liquid sheets for animating liquids on CPU–GPU heterogeneous computing framework. Our primary contribution is a particle-based framework that splits at thin points and collapses at dense points to prevent the breakup of liquid on GPU. In contrast to existing surface tracking methods, the our method does not suffer from numerical diffusion or tangles, and robustly handles topology changes on CPU–GPU framework. The thin features are detected by examining stretches of distributions of neighboring particles by performing PCA(Principle component analysis), which is used to reconstruct thin surfaces with anisotropic kernels. The efficiency of the candidate position extraction process to calculate the position of the fluid particle was rapidly improved based on the CPU–GPU heterogeneous computing techniques. Proposed algorithm is intuitively implemented, easy to parallelize and capable of producing quickly detailed thin liquid animations.

키워드: 이기종 컴퓨팅, 액체의 얇은 막, 유체 시뮬레이션, 표면추적
Keywords: Heterogeneous computing, Thin sheets of liquid, Fluid simulation, Surface tracking

*corresponding author: Jong-Hyun Kim/Kangnam University(jonghyunkim@kangnam.ac.kr)

Received : 2017.12.09./ Review completed : 1st 2018.02.14. / Accepted : 2018.04.30.
DOI : 10.15701/kcgs.2018.24.2.11
ISSN : 1975-7883(Print)/2383-529X(Online)

1. 서론

유체와 고체의 상호작용으로부터 표현되는 디테일한 유체의 난류를 표현하는 것은 물리 기반 시뮬레이션 분야에서 핫이슈이다. 특히, 난류를 포함하는 유체를 애니메이션 할 때 세밀한 디테일을 생성하고 표현하는 것은 굉장히 중요한 부분이다. 이 문제를 개선하기 위해 많은 기법들이 제안되어 왔다. 물리 기반 [1, 2, 3], 노이즈와 텍스쳐 기반 [4, 5, 6] 기법들은 유체 시뮬레이션 분야에서 꾸준히 소개되어 왔다.

적응형 격자와 멀티그리드 방법들은 유체 시뮬레이션에서 다양하게 표현되는 난류 흐름을 모델링하기 위해 널리 사용되었다 [7, 8, 9]. 더 높은 해상도를 갖는 격자공간에서 Navier-Stokes 방정식을 풀어냄으로써 작은 디테일의 와류 현상을 일시적으로 표현할 수 있다. 그러나 와류가 고해상도 격자공간에서부터 멀어지면 그 디테일한 움직임을 보존하기 어려워진다. 이러한 문제를 해결하여 작은 난류의 움직임까지 표현하고자, 격자가 아닌 입자들을 이용하여 와류를 표현하는 하이브리드 프레임워크 기법들이 소개되어왔다 [10, 11].

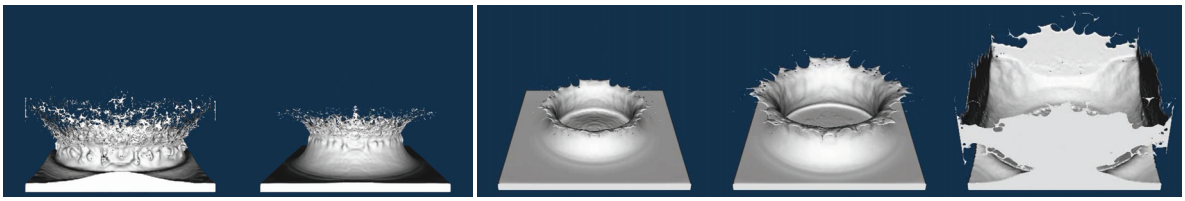
Muller et al.가 제안한 SPH(Smoothed particle hydrodynamics) 기법 [12] 이후로 입자 기반 시뮬레이션 분야는 많은 발전이 있었다 [13, 14, 15]. 기존의 입자 기반 방법은 거품이나 스플래시 애니메이션에는 적합하지만 스프링력(Spring force)으로 인한 진동문제가 발생하기 때문에 얇은 유체의 특징을 표현하기에는 충분하지 못하다. 격자–입자 하이브리드 접근법들이 많이 제안되었지만 유체의 얇은 특징을 표현하기에는 충분하지 않으며 [16, 17, 18], 격자의 해상도나 입자의 개수를 많이 사용하여 표현될 수 있는 접근법 또한 큰 계산량을 요구하기 때문에 실제로 유용하게 사용되지 않는다.

본 논문에서는 액체의 얇은 특징을 보존하는 새로운 입자 기반 CPU–GPU 이기종 프레임워크를 소개한다. 제시된 방법을 사용하면 유체 표면의 추적뿐만 아니라 얇은 표면이 사라지는 부분을 찾아내고 새로운 입자를 추가하거나 삭제할 수 있다. 우리는 Particle-in-cell(PIC)/Fluid-implicit-particle(FLIP) 방법을 기반유체 해법으로 사용하며, 결과적으로 입자기반 유체 시뮬레이션에서 표현되는 얇은 유체의 특징을 캡처하는 CPU–GPU 이기종 프레임워크이다 (그림 1 참조). 얇아서 소실되는 액체의 표면은 새로운 유체입자를 추가하여 보존하고, 추가된 입자는 유체의 얇은 특징이 추출될 수 있는 부분이 아닌 곳(예: Deep water 영역)에 들어가면 제거된다. 본 연구는 Yu and Turk 이 제안한 이방성 커널 방법에 영향을 많이 받는다 [19]. 이 방법은 주변 입자들의 위치를 이용하여 PCA를 수행하고, 결과적으로 날카롭고 매끄러운 유체표면을 복원하기 위해 입자의 신축(Stretch)과 방향(Orientation)을 계산한다. 우리는 GPU 기반 솔루션을 활용하여 PCA를 수행하고 [20], 유체입자를 삽입할지 여부를 결정하는 기준으로 이 신축 값을 사용한다.

2. 관련 연구

액체의 최신 표면추적 기술은 두 가지 접근 방식으로 분류 할 수 있다: Implicit 방법과 Explicit 방법. Osher and Sethian [21] 이 제안한 Level-set 방법은 가장 널리 사용되는 Implicit 방법 중 하나이다. Level-set 방법에서는 각 그리드 노드에서 가장 가까운 표면 위치로부터 거리 함수를 계산하고, 거리 값이 0 인 곳에서 암시적(Implicit)으로 표면을 정의한다. 이 방법은 그동안 다양한 측면에서 개선되고 수정되었다. Enright et al. [22], Wang et al. [23], and Mihalef et al. [24]은 Lagrangian 입자를 배치하여 수치적 손실을 막았다. Bargteil et al.은 정확한 유체의 표면을 추적하기 위해 복원된 표면 메쉬로부터 부호거리장을 업데이트하는 방법을 제안했다 [25]. Heo and Ko는 스펙트럼으로 정제된 Level-set과 고차 재 초기 방법(High-order reinitialization)으로 유체 표면의 디테일을 보존했다 [26]. 위와 같은 Implicit한 방법을 고해상도 격자에서 풀게되면 전반적인 유체의 디테일을 높일 수 있다. 그러나 이러한 접근법을 활용하여도 유체의 얇은 막과 같은 특징을 캡처하기에는 충분하지 않다.

Explicit한 접근법 중 Hirt and Nichols [27]는 전체 셀에 대해서 유체의 비율을 이용하는 Volume of fluid(VOF) 기법을 제안하여 불연속적인 인터페이스를 효율적으로 표현하였다. 좀 더 다른 방향으로는 지난 수 십년 동안 의료 영상 분석 및 유체역학과 같은 다양한 연구분야를 통해 다양한 메쉬 기반(Mesh-based) 표적추적기법들이 제안되었다 [28, 29, 30]. 일반적으로 메쉬 기반 표면추적기법에서는 메쉬의 정점과 같은 명시적인 표면 요소들을 유체의 흐름에 따라 이류시킨다. 그러나, 이 방법은 자기 교차(Self-intersection)나 복잡한 토폴리지(Complex topology) 변형은 어렵기 때문에 일반적으로 자주 쓰이는 방법은 아니다. 이러한 문제는 인접한 격자 위치를 재 검색하여 다시 샘플링함으로써 해결할 수 있지만, 이 전략은 여러 복잡한 상황을 모두 고려해야 하기 때문에 알고리즘을 복잡하게 만든다. 입자 기반 접근법은 Explicit 접근법처럼 메쉬의 정점을 보유하지 않고 오직 입자를 이용하여 유체의 표면을 표현하기 때문에 알고리즘 측면에서도 복잡하지 않다. SPH 방법 [12, 31, 32], Moving particle semi-implicit(MPS) 방법 [33, 34], Meshless 물리 기반 시뮬레이션 [35, 36, 37]과 같은 입자 기반 방법들은 일반적으로 물리 기반 시뮬레이션 뿐만 아니라 유체의 표면을 복원하는데에도 종종 사용되곤 한다. Blinn [38], Zhu and Bridson [17], Adams et al. [39], Yu and Turk [19]는 Point cloud 로부터 좀 더 정확하게 표면을 복원할 수 있는 방법을 제안했다. 본 논문에서 활용하는 분할 가능한(Splittable) 입자 기반 접근법은 적응형 입자 방법의 범주에 속한다. 우리방법과 이 방법의 가장 큰 차이점으로는 유체의 얇은 막과 같은 특징을 지속적으로 유지할 수 있도록 제작된 반면, 다른 하나는 입자의 크기를 다르게 하여 샘플링함으로써 유체의 시각적인 디테일을 유지하면서 계산 비용을 줄이는 것이다.



(a) Particle-based fluids (b) Our method

Figure 1: Water splash by our method with CPU-GPU heterogeneous framework. Right two columns in (b): A visualized splash with particles. A thin surface generated by GPU-based anisotropic kernels.

3. 제안하는 프레임워크

제안하는 방법에서는 FLIP [17, 40]기반의 3차원 유체입자들을 이용하여 유체의 얇은 특징을 생성하고 유지하는 최적화된 CPU–GPU 이기종 프레임워크이며, 이 알고리즘은 아래와 같은 순서로 수행된다.

- **Step1:[GPU]** 유체입자의 밀도계산, 표면입자 추출
- **Step2:[GPU]** 입자의 방향성 계산, 유체입자의 Pair 찾기, 새롭게 추가될 유체입자의 후보위치 추출
- **Step3:[CPU Parallel]** 후보위치 최적화
- **Step4:[CPU Serial]** 새로운 유체입자 추가 및 삭제
- **Step5:[GPU]** 수치적 행렬해법을 이용한 압력계산
- **Step6:[CPU Parallel]** 유체입자의 이류
- **Step7:[GPU]** 유체표면 복원

3.1 이기종 프레임워크를 이용한 액체의 얇은 막 유지 기법

3.1.1 얇은(Thin)입자 추출

제안하는 방법은 유체의 막을 유지할 수 있는 Ando의 방법을 기반으로 한다 [40]. 먼저 이방성 커널을 사용하여 입자들의 분포를 분석한다. 입자의 방향성을 추출하기 위해 우선 다음과 같이 입자마다 가중치 평균 공분산 C_i를 계산한다 (수식 1 참조).

$$\mathbf{C}_i = \frac{\sum_j (\mathbf{p}_j - \overline{\mathbf{p}_i})(\mathbf{p}_j - \overline{\mathbf{p}_i})^T W_{smooth}(\mathbf{p}_j - \overline{\mathbf{p}_i}, \alpha_1 d_0)}{\sum_j W_{smooth}(\mathbf{p}_j - \overline{\mathbf{p}_i}, \alpha_1 d_0)}, \quad (1)$$

여기에서 d_0는 유체입자들 사이의 초기 거리 값이며, α_1은 초기 거리 값 d_0을 조절하는 변수이다.

$$\overline{\mathbf{p}_i} = \frac{\sum_j \mathbf{p}_j W_{smooth}(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i, \alpha_1 d_0)}{\sum_j W_{smooth}(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i, \alpha_1 d_0)}, \quad (2)$$

$$W_{smooth}(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} 1 - \|\mathbf{r}\|^2 / h^2, & 0 \le \|\mathbf{r}\| \le h, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3)$$

위 수식들을 사용하여 계산된 공분산 행렬 $\mathbf{C}_i$와 SVD(Singular value decomposition)를 이용하여 입자의 분포에 대한 고유 벡터와 고유 값을 계산한다. 이 값으로부터 인접 입자 사이의 스트레칭과 방향성을 추출한다.

$$C_i = \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \sigma_2 & \\ & & \sigma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{bmatrix}, \quad (4)$$

```
p[i]: pivot particle
p[j]: neighbor particle
density: density of pivot particle
maxDensity: max density
candidateType: surface particles with density

void ComputeDensityGPUKernel(...)
{
    for j=0, neighborParticles do {
        density += densityKernel(p[i],p[j])
    }

    p[i].density <- density
    if(p[i].type == WALL) p[i].density <- 1.0
    if(density < maxDensity) candidateType[i] <- 1
}
```

Figure 2: Pseudo code for computation of particle density in GPU.

```
cov: covariance matrix

void ComputeSvdGPUKernel(...)
{
    if(p[i].type == WALL) return
    for j=0, neighborParticles do {
        // 공분산 행렬 covMat계산
        cov += ComputeCovMat(p[i],p[j])
    }
    // GPU기반 svd계산
    ComputeSvd(..., cov);
}
```

Figure 3: Pseudo code for computation of covariance matrix and singular value decomposition in GPU.

여기서 e_n은 분산에 의해 추출된 주축 성분을 나타내며 σ_n

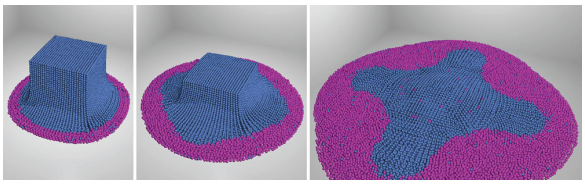


Figure 4: Selected thin particles from water particles (thin particles are colored violet and lie on the outer edge of the fluid body).

는 스트레칭 정도를 나타낸다. 얇은 표면에 존재하는 Thin입자는 $\sigma_3 \leq \alpha_2\sigma_1$를 검사하여 추출한다. 여기서 α_2는 두께의 정도를 결정하는 임계 값이다.

그림 2와 3은 유체입자의 밀도와 공분산 행렬을 이용한 SVD 계산까지의 과정을 CUDA kernel로 계산한 Pseudo code이다. 이 과정은 3장에서 설명한 **Step1:[GPU]**과 **Step2:[GPU]**에 해당한다. 그림 2는 유체입자의 밀도 값을 이용하여 대략적으로 표면입자를 분류하는 Pseudo code이며 (그림 4 참조), 그림 3은 인접 입자들과의 거리 값을 이용하여 공분산 행렬을 계산하는 Pseudo code이다. 최종적으로 SVD를 이용하여 고유 벡터와 고유 값을 계산하는 부분은 GPU 기반의 병렬 프로그래밍을 통해 계산한다 [20].

3.1.2 후보위치 추출과 최적화

추출된 Thin입자들은 Hole 부분에 새로운 입자를 추가하는데 사용된다. 우리는 Hole을 채워 넣을때 사용하는 입자들의 Pair인 (i, j)를 찾는다. Pair의 중심 위치인 $(\mathbf{p}_i+\mathbf{p}_j)/2$는 분할(Splitting)을 하기 위한 후보위치로 사용하기 위해 저장시키고, 아래 조건을 모두 만족하는 Pair를 최종적으로 선택한다:

$$\alpha_3 d_0 \leq \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| \leq \alpha_4 d_0, \tag{5a}$$

$$\sum_k W_{smooth}((\mathbf{p}_i + \mathbf{p}_j)/2 - \mathbf{p}_k, \alpha_3 d_0) = 0, \tag{5b}$$

$$(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \cdot (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_j) > 0, \tag{5c}$$

여기서 α_3와 α_4는 각 후보위치 사이의 최소 거리와 최대 거리를 제어하는 상수이며, $\mathbf{u}$는 입자의 속도이다. 수식 5a는 두 입자가 서로 적당한 거리에 있는지 검사하는 것이다. 수식 5b는 반지름 α_3에 새로운 입자를 추가하기에 적당한지를 판단하기 위한 조건이며, 후보위치 주변에 유체입자가 없는지, 다시말해, 희박한 영역인지를 검사하는 것이다. 수식 5c에서는 한 쌍의 유체입자들 사이의 거리가 시간이 지남에 따라 증가하는지 확인한다. 결과적으로 위 조건을 모두 만족하는 Pair의 중간 위치를 중복 없이 $\mathbf{S}$에 저장시킨다.

그림 5는 후보위치들을 추출하기 위한 과정을 CPU 기반 병렬 모듈로 계산한 Pseudo code이며, 이 과정은 **Step3:[GPU]**에 해당한다. Ando et al. [40]의 방법에서는 모든 유체입자에 대

```
dist: distance of p[i] and p[j]

// OpenMP part
for i=0, maxThreads do {
    for it=m_Pair[i].begin(),...) {
        delete (*it)
    }
}

for i=0, allParticles do {
#Start <- OpenMP parallel part
    tid <- thread id of OpenMP
    for j=0, neighborParticles do {
        dist <- length(p[i],p[j])
        // Test: Equation 5a and 5c
        testIsTrue <- TestEqn5aAnd5c(..);
        if(testIsTrue)
            m_Pair[tid] <- new Pair(..)
    }
#End <- OpenMP parallel part
}
```

Figure 5: Pseudo code for pair collection in CPU.

해서 3가지 조건을 모두 검색하여 중복없이 만족하는 Pair를 찾기 때문에 계산 시간이 오래 걸린다. 우리는 이를 효율적으로 처리하기 위해 CPU–GPU 이기종 병렬 프레임워크로 분할하여 계산한다.

```
pos0: position of 1st particle in Pair
pos1: position of 2nd particle in Pair
midPos: average position in Pair

// OpenMP part
// Transfer buffer to GPU from CPU
for i=0, maxThreads do {
    for j=0, m_Pair[i].begin() do {
        m_PairCuda <- m_Pair[i][j]
    }
}

void CandidatePosOptGPUKernel(...)
{
    pos0 <- m_PairCuda[i].pos0
    pos1 <- m_PairCuda[i].pos1
    midPos <- avgPos(pos0,pos1)
    // Test: Equation 5b
    for j=0, neighborParticles do {
        testIsTrue <- TestEqn5b(midPos,p[j])
        if(testIsTrue) count++
    }
    m_PairCuda[i].valid <- count==0?1:0
}
```

Figure 6: Pseudo code for optimization of candidate position in GPU.

그림 5는 수식 5를 만족하는 Pair를 찾기 위한 과정을 처리하는 Pseudo code이다. 본 논문에서 CPU 기반 병렬처리는 OpenMP를 이용하였으며 CPU에서 제공하는 최대 스레드 개수(`omp_get_max_threads()`)만큼 Pair버퍼를 생성하고, 수식 5a와 5c 조건들을 만족하는 Pair를 각 스레드 인덱스에 맞는 Pair버퍼에 저장시킨다 (`m_Pair[omp_get_thread_num()]`). 이 과정에서 계산된 Pair집합들에서는 많은 수의 후보 Pair들이 추출되기 때문에 모든 인접 입자들을 필요로 하는 수식 5b는 계산 시간이 오래 걸린다. 우리는 이 과정을 효율적으로 계산하기 위해

```
m_Pair[i][j].p0: 1st particle in Pair
m_Pair[i][j].p1: 2nd particle in Pair


if(numberPair<=0) return
// OpenMP part
for i=0, maxThreads do {
    // m_Pair[i] <- m_PairCuda in 그림6
    for j=0, m_Pair[i].size() do {
        // Pair를 저장시키는 버퍼S
        S <- new PairParticle(m_Pair[i][j].p0,
                              m_Pair[i][j].p1)
    }
}
```

Figure 7: Pseudo code for compuing **S** buffer in CPU.

GPU 기반 병렬처리로 수행한다 (그림 6 참조). 최종적으로 GPU상에서 계산된 Pair버퍼(`m_PairCuda`)를 CPU로 전달한다(`m_Pair[i][]`). 그림 7은 이 과정을 수행하는 Pseudo code 이며 결과적으로 **S**버퍼를 구성한다. 다음 장에서는 이 버퍼를 이용하여 새로운 유체입자의 추가와 삭제방법을 설명한다.

3.1.3 유체입자 추가와 삭제

추출한 후보위치 리스트인 **S**의 개수가 많기 때문에 이를 간소화하기 위한 방법이 필요하다. 이번 장에서는 불필요한 유체입자들을 필터링하고, 유체의 얇은 표면을 유지하기 위해 필요한 최소 개수의 유체입자로 Hole-filling하는 방법에 대해 설명한다. 추가된 후보위치들의 최종 버퍼를 **I**라고 부르며 지금부터 이 버퍼를 결정하는 방법을 설명한다. 이 버퍼에서 첫 번째 입자인 I_1에는 **S**에서 밀도를 기반으로 가장 희박한(Sparse) 후보위치를 저장한다 (수식 6 참조):

$$I_1 = \underset{j \in size\,\mathbf{S}}{\operatorname{argmin}} \left(\rho_j \mathbf{s}_j\right), \tag{6}$$

여기서 ρ_j는 유체입자 j의 밀도이다. **S**에서 I_1을 결정한 후, 우리는 $\mathbf{s}_{I_1}$의 주변 입자들로부터 반경이 $\alpha_3 d_0$ 내에 존재하는 후보 입자들을 삭제한다. 다음 단계에서는 $\mathbf{s}_{I_1}$의 주변입자들로부터 반지름 α_3 외부에있는 입자들을 검색하여 $\mathbf{N}_{I_1}$에 추가한다. $\mathbf{N}_{I_1}$에 있는 입자들 중 가장 가까운 입자 $\mathbf{s}_j$를 I_2에 추가한다 (수식 7 참조):

$$I_2 = \underset{j \in \mathbf{N}_{I_1}}{\operatorname{argmin}} \left\|\mathbf{s}_j - \mathbf{s}_{I_1}\right\|. \tag{7}$$

I_2가 I_1에서 발견되는 검색방법을 $I_{n+1} = \text{search}(I_n)$으로 정립할 수 있고, 이 작업을 반복하면서 $I_3, I_4, I_5 ..., I_{n+1}$를 순차적으로 처리한다. 만약에 검색이 실패하여 적당한 유체입자를 찾지 못하면 수식 6을 대신 사용한다.

유체입자가 분할된 후에 분할된 각 입자들의 속도와 무게 값들은 선형 보간으로 할당된다. 아래 수식을 이용하여 Eulerian 격자에 매핑된 속도 **u**와 입자의 밀도 ρ를 계산한다:

$$u\left(\mathbf{x}\right) = \frac{\sum_i m_i \mathbf{u}_i W_{sharp}\left(\mathbf{p}_i - \mathbf{x}, \alpha_5 d_0\right)}{\sum_i m_i W_{sharp}\left(\mathbf{p}_i - \mathbf{x}, \alpha_5 d_0\right)}, \tag{8}$$

$$\rho\left(\mathbf{x}\right) = \sum_i m_i W_{smooth}\left(\mathbf{p}_i - \mathbf{x}, \alpha_1 d_0\right), \tag{9}$$

여기서 α_5는 속도 **u**의 크기를 조절하는 변수이고, W_{sharp} 커널은 아래와 같다.

$$\nabla W_{sharp}(\mathbf{r}, h) = \begin{cases} h^2 / \left\|\mathbf{r}^2\right\| - 1, & 0 \le \|\mathbf{r}\| \le h, \\ 0, & otherwise. \end{cases} \tag{10}$$

추가된 유체입자 i는 다음 두 가지 중 하나를 만족하면 삭제한다:

$$\rho_i > \alpha_6 \rho_0 \text{ and } \alpha_3 \ge \alpha 2 \sigma_1, \tag{11a}$$

$$\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| < \alpha_7 d_0, \text{ for any } j \ne i, \tag{11b}$$

여기서 α_6은 최대 밀도계수를 나타내고, α_7은 입자 사이의 최소 거리를 나타낸다. 수식 11을 만족하는 유체입자들은 모두 삭제를 한다. 이 과정에서 한 번에 많은 양의 입자들이 삭제되면 깜빡거리는 문제가 발생하는데 이를 줄이기 위해 난수값을 이용하여 삭제되는 시점을 조금씩 다르게 하였다.

이 유체입자를 추가/삭제하는 과정은 I_n이 처리된 다음 I_{n+1}이 처리 되어야 하는 Serial한 구조이기 때문에 Ando et al. [40]가 제안한 알고리즘과 동일하게 처리하였다.

3.1.4 유체의 표면복원

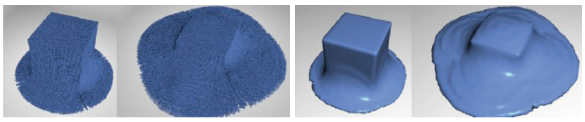
수식 4의 SVD 값은 이방성 커널에 재사용할 수 있기 때문에 Yu et al. [19] 알고리즘에 재사용하여 얇은 표면을 재구성하는데 사용한다 (수식 12 참조).

$$\phi\left(\mathbf{x}\right) = \min_i \left(\left\|G_i\left(\mathbf{p}_i - \mathbf{x}\right)\right\|\right), \tag{12}$$

여기서 G_i는 유체입자 i에 대한 변형행렬을 나타낸다.

$$G_i = \frac{1}{k_s} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sigma_1 & & \\ & \sigma_2 & \\ & & \sigma_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{bmatrix} \tag{13}$$

여기서 k_s는 스케일링 상수이다. 중요한 스트레칭부분을 보존하기 위해서 σ_n은 일정 범위 내로 제한한다. 좀 더 자세한 설명은 Yu et al. [19] 연구를 참조하길 추천한다. 본 논문에서는 GPU 기반 Marhcing Cube 알고리즘을 사용했으며 [41], 이 방법과 맞물려서 얇은 유체표면이 잘 캡처되도록 최소 스트레칭을 격자 너비의 절반보다 크게 설정하였다.



(a) Water particles (b) Water surfaces

Figure 8: GPU-based fluid surface reconstruction.

4. 구현

제안된 방법이 구현된 환경은 아래와 같다: Intel i7-2600k 3.40 GHz CPU 16GB RAM, NVIDIA GeForce GTX 480 graphics card. FLIP기반 유체해법을 기반액체(Underlying water) 시뮬레이션으로 사용했으며, 유체의 압력을 계산하는 수치적 행렬해법은 GPU 기반 Preconditioned conjugate gradient [42] 방법을 이용하였고, GPU 기반 SVD계산은 Lahabar의 방법을 활용하였다 [20]. FLIP격자의 경우 모든 운동량은 Staggered Marker-and-Cell 방법을 사용하여 저장했으며 [43], 표면 재복원을 위해 추가적인 격자를 사용하였다. 물과 고체의 충돌처리를 위해 변량(Variational) 프레임워크를 사용했다 [44].

```
void PreserveThinFluidSheet(void)
{
    ...// Compute hashing
    ComputeDensityGPUKernel()   // 그림2
    ComputeSvdGPUKernel()       // 그림3
    FindPair()                  // 그림5,6
    ComputeS()                  // 그림7
    AddRemoveParticle()         // 3.1.3장
    PressureSolver()
    AdvectParticle()
    MakeFluidSurface()          // 3.1.4장
}
```

Figure 9: Pseudo code of our framework.

그림 9는 본 논문에서 제안하는 얇은 유체의 특징을 보존하는 알고리즘의 Pseudo code이다. 격자와 유체입자 사이에서 운동량을 전달하거나 압력을 계산하는 모든 전반적인 계산이 CPU와 GPU 기반 병렬 프레임워크에서 수행된다.

5. 결과

제안하는 프레임워크를 다양한 방면으로 분석하기 위해 5가지 시나리오에서 우리의 방법을 비교했다.

우리는 간단한 테스트 시나리오 상에서 제안하는 기법의 우수성을 입증하기 위해 구형 액체를 위에서 떨어뜨리는 장면을 제작했다(그림 10 참조). 이 장면에서 기반유체를 표현하기 위해 타입 스텝을 0.006으로 설정하고, 30만개의 유체입자들을 사용하였다. 우리의 기법은 CPU 기반 기법인 Ando et al. [40]의 방법과 동일한 결과를 만들어 내면서 결과적으로 ×6배 빠른 결과를 보여주었다. 그림 10에서 보듯이 구형 액체가 메인 유체와 충돌 됨에 따라 나타나는 유체의 얇은 막과 필라멘트(Filaments)를 빠르고 명확하게 표현했다.

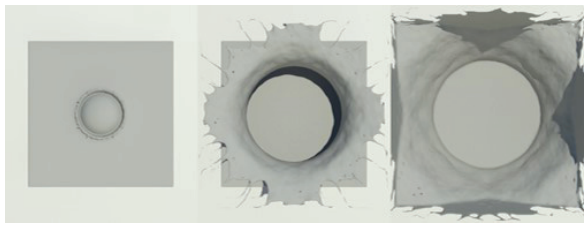
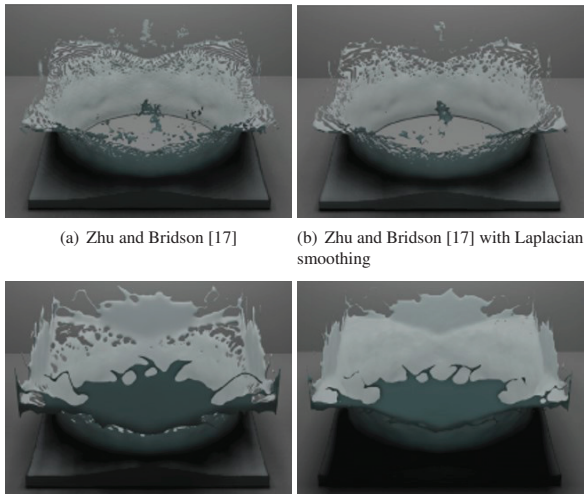


Figure 10: Thin sheet surfaces of liquid by our method.

그림 11은 제안된 기법의 결과품질을 비교한 결과이다. Zhu and Bridson방법은 얇은 막이 표현되는 부분에서 표면 소실이 많이 일어나며 (그림 11a 참조), 이런 문제를 줄이고자 표면의 Level-set값을 Smoothing 시키면 수치적으로는 좀 나아지지만 시각적으로 개선이 크게 되지 않는다 (그림 11b 참조). 최근에 Bhatacharya et al. [45]은 유체표면을 좀 더 정확하게 캡처하고자 Biharmonic smoothing기법을 제안했다. 이 논문은 Laplacian smoothing에 비해 좀 더 부드러운 유체의 표면을 캡처하여 개선된 결과를 보여주지만, 얇은 유체의 막 부분에서 여전히 소실 문제가 발생한다 (그림 11c 참조). 하지만 우리의 방법은 결과적으로 소실 문제를 최소화하여 디테일한 유체의 표면을 표현하였으며, GPU 프레임워크로 기존 방법보다 빠르게 장면을 제작하였다. 장면구성과 성능개선은 그림 10의 결과와 같다.



(a) Zhu and Bridson [17] (b) Zhu and Bridson [17] with Laplacian smoothing

(c) Bhatacharya et al. [45] (d) Our method

Figure 11: Comparison results: dropping a liquid sphere.

유체의 얇은 표면이 나타나는 디테일한 특징은 고체와 유체가 충돌되는 커플링 장면에서도 쉽게 확인할 수 있다. 제안하는 모델이 커플링 장면에서도 잘 동작한다는 것을 입증하기

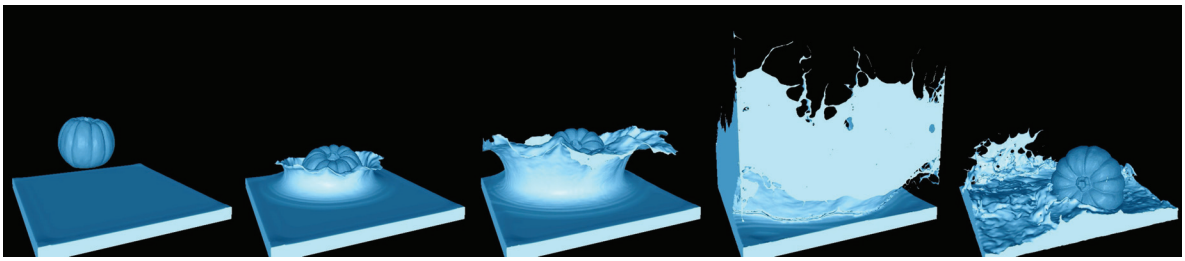
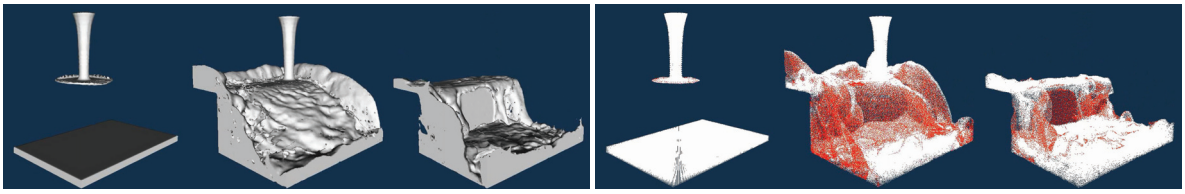
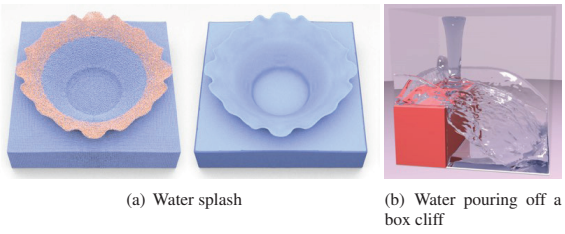


Figure 12: Deformable pumpkins thrown from various directionos.



(a) Water surfaces (b) Water particles (red: inserted thin particle)

Figure 13: Water pouring off a box cliff.



(a) Water splash (b) Water pouring off a box cliff

Figure 14: Results with Ando's method [40].

위해, 우리는 변형체 모델을 유체에 던져 자연스럽게 스플래시 현상이 나타나도록 하였다 (그림 12 참조). 호박(Pumpkins) 모델이 물에 닿는 순간 표현되는 Water crown 형태를 잘 표현한다. 뿐만 아니라 바운더리에 물이 닿았을 때도 유체표면이 깨지지 않고 깔끔하게 유체표면을 표현하였다. 이 장면에서는 120만개의 유체입자들을 사용하였고, Ando et al. [40]의 방법과 동일한 결과를 만들어 내면서 결과적으로 ×10배 빠른 결과를 보여주었다.

제안된 방법을 이용했을 때 실제로 어떤 부분에서 Thin입자들이 추가되어 결과적으로 유체의 얇은 표면을 유지할 수 있는지를 보여주기 위해 Water pouring 장면을 제작하였다. 그림 13a는 Water pouring으로 인해 물이 상단에서 하단으로 떨어지면서 표현되는 유체의 얇은 표면을 보여주고 있으며, 같은 장면에서 유체입자는 그림 13b에서 보여준다. 이 장면은 다른 장면에 비해 유체의 얇은 막이 많이 표현되는 장면이며, 이 같은 특징은 유체입자에서도 컬러로 쉽게 보여진다. 빨간색은 새롭게 추가된 Thin입자이며, 이 입자들로 인해 유체의 얇은 막들이 표현된다. 이 결과는 Ando et al. [40]의 방법에서도 동일하게 만들어낼 수 있지만, 제안된 기법은 Ando의 기법보다 ×7배 정도 빠른 결과를 보여주었다. 그림 14는 Ando et al. [40]의 결과이며, 제안된 결과는 Ando의 기법과 시각적 비교했을때 큰 차이없이 비슷한 결과를 만들어 냈다. 그림 14a는 Water splash를 표현한 결과이며, 그림 1b와 그림 10의 결과와 비교했을때 유체의 얇은 막을 잘 표현했다. 그림 14b 또한 그림 13와 비교했을때 시각적으로 유사한 결과를 만들어 냈다. 유체의 얇은 막을 유지하려는 추가적인 입자들의 개수가 많아지기 때문에 증가되는 계산 시간을 이기종 프레임워크로 최적화하였다. 일반적으로는 압력을 계산하는 Pressure solver 부분이 계산 양이 크다는 점과는 다소 차이점이 있다.

그림 15는 물을 박스로 마구 휘젓는 장면이며, 다른 장면들과 마찬가지로 유체의 디테일한 특징을 잘 캡처하였다. 이 장면에서 사용한 유체입자는 약 100만개이며, 우리의 방법은 Ando의 기법보다 ×4배 정도 빠른 결과를 보여주었다.

6. 결론 및 향후 연구

우리는 유체의 얇은 막을 효율적으로 표현하기 위한 CPU–GPU 기반 이기종 프레임워크를 설명했다. 계산양이 큰 부분은 GPU를 이용하였고, 그렇지 않은 부분은 CPU 기반 병렬기법을 사용했다. GPU는 병렬계산을 위해 CPU에서 GPU로 데이터를 복사하고, 계산된 결과를 다시 반영하기 위해 GPU에서 CPU로 다시 복사하는 과정이 추가된다. 우리는 이 불필요한 과정을 줄이기 위해 계산양이 크지 않은 부분은 CPU 기반 병렬기법을 사용했다.

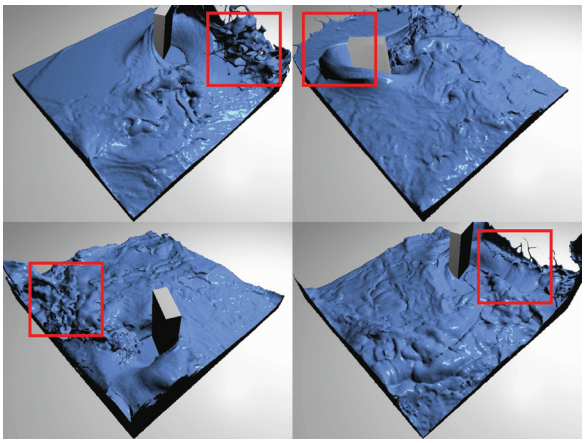


Figure 15: Water pool interacting wth a stirring box.

앞에서 본 결과들에서 성능개선을 측정하기 위한 방법은 유체의 얇은 막이 계산되는 부분만 측정했으며, 모든 결과에서 Ando et al. [40]의 프레임워크보다 빠른 시간 내에 결과를 만들어냈다. 장면마다 성능개선 정도가 다르지만 제안된 알고리즘은 장면 내 Thin입자들의 개수에 비례하여 성능개선이 되었다. 3.1.2장에서 설명한 후보위치의 개수 또한 Thin입자의 개수에 비례해서 생성된다. 결과적으로 제안된 프레임워크는 초기장면에서 생성한 전체 유체입자의 개수와 그로인해 생성되는 Thin입자의 개수가 제안된 프레임워크의 성능에 영향을 끼쳤다.

제안된 기법의 한계점은 메모리 부족으로 인해 고해상도의 장면을 제작하기 어렵다는 것이다. 유체의 얇은 막을 표현하기 위해서는 초기 장면에 설정된 유체입자의 개수보다 많은 입자들이 필요하며, 장면마다 Thin입자들의 개수가 많이 증가될 수 있다. GPU에서는 가용 메모리의 크기가 제약적이기 때문에 큰 스케일의 장면을 제작하기 위해서는 최적화된 메모리 관리 기법이 필요하며, 향후 우리는 이 메모리 관리를 효율적으로 사용하여 큰 스케일의 유체 시뮬레이션을 모델링 할 수 있는 방법에 대해 연구할 계획이다.

참고 문헌

[1] J.-M. Hong, T. Shinar, and R. Fedkiw, "Wrinkled flames and cellular patterns," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, 2007.

[2] D. Kim, S. W. Lee, O.-y. Song, and H.-S. Ko, "Baroclinic turbulence with varying density and temperature," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 18, no. 9, pp. 1488–1495, 2012.

[3] D. Kim, O.-y. Song, and H.-S. Ko, "Stretching and wiggling liquids," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 5, pp. 120:1–120:7, 2009.

[4] T. Kim, N. Thürey, D. James, and M. Gross, "Wavelet turbulence for fluid simulation," in *ACM Transactions on Graphics*, vol. 27, no. 3, 2008, p. 50.

[5] T. Pfaff, N. Thuerey, J. Cohen, S. Tariq, and M. Gross, "Scalable fluid simulation using anisotropic turbulence particles," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 6, p. 174, 2010.

[6] T. Pfaff, N. Thuerey, A. Selle, and M. Gross, "Synthetic turbulence using artificial boundary layers," in *ACM SIGGRAPH Asia*, 2009, pp. 121:1–121:10.

[7] Y. Dobashi, Y. Matsuda, T. Yamamoto, and T. Nishita, "A fast simulation method using overlapping grids for interactions between smoke and rigid objects," in *Computer Graphics Forum*, vol. 27, no. 2, 2008, pp. 477–486.

[8] B. M. Klingner, B. E. Feldman, N. Chentanez, and J. F. O'brien, "Fluid animation with dynamic meshes," in *ACM Transactions on Graphics*, vol. 25, no. 3, 2006, pp. 820–825.

[9] F. Losasso, F. Gibou, and R. Fedkiw, "Simulating water and smoke with an octree data structure," in *ACM Transactions on Graphics*, vol. 23, no. 3, 2004, pp. 457–462.

[10] D. Kim, S. W. Lee, O.-y. Song, and H.-S. Ko, "Baroclinic turbulence with varying density and temperature," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 18, no. 9, pp. 1488–1495, 2012.

[11] A. Selle, N. Rasmussen, and R. Fedkiw, "A vortex particle method for smoke, water and explosions," in *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, 2005, pp. 910–914.

[12] M. Müller, D. Charypar, and M. Gross, "Particle-based fluid simulation for interactive applications," in *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, 2003, pp. 154–159.

[13] 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*, 2010, pp. 55–64.

[14] T. Harada, S. Koshizuka, and Y. Kawaguchi, "Smoothed particle hydrodynamics on gpus," in *Computer Graphics International*, 2007, pp. 63–70.

[15] H. Yan, Z. Wang, J. He, X. Chen, C. Wang, and Q. Peng, "Real-time fluid simulation with adaptive sph," *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 20, no. 2-3, pp. 417–426, 2009.

[16] F. Sin, A. W. Bargteil, and J. K. Hodgins, "A point-based method for animating incompressible flow," in *Proceedings of the 2009 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 2009, pp. 247–255.

[17] Y. Zhu and R. Bridson, "Animating sand as a fluid," in *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, 2005, pp. 965–972.

[18] F. Losasso, J. Talton, N. Kwatra, and R. Fedkiw, "Two-way coupled sph and particle level set fluid simulation," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 14, no. 4, pp. 797–804, 2008.

[19] J. Yu and G. Turk, "Reconstructing surfaces of particle-based fluids using anisotropic kernels," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 32, no. 1, p. 5, 2013.

[20] S. Lahabar and P. Narayanan, "Singular value decomposition on gpu using cuda," in *Parallel & Distributed Processing, 2009. IPDPS 2009. IEEE International Symposium on*, 2009, pp. 1–10.

[21] S. Osher and J. A. Sethian, "Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on hamilton-jacobi formulations," *Journal of computational physics*, vol. 79, no. 1, pp. 12–49, 1988.

[22] D. Enright, R. Fedkiw, J. Ferziger, and I. Mitchell, "A hybrid particle level set method for improved interface capturing," *Journal of Computational physics*, vol. 183, no. 1, pp. 83–116, 2002.

[23] Z. Wang, J. Yang, and F. Stern, "An improved particle correction procedure for the particle level set method," *Journal of Computational Physics*, vol. 228, no. 16, pp. 5819–5837, 2009.

[24] V. Mihalef, D. Metaxas, and M. Sussman, "Textured liquids based on the marker level set," in *Computer Graphics Forum*, vol. 26, no. 3, 2007, pp. 457–466.

[25] A. W. Bargteil, T. G. Goktekin, J. F. O'brien, and J. A. Strain, "A semi-lagrangian contouring method for fluid simulation," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 25, no. 1, pp. 19–38, 2006.

[26] N. Heo and H.-S. Ko, "Detail-preserving fully-eulerian interface tracking framework," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 6, p. 176, 2010.

[27] C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries," *Journal of computational physics*, vol. 39, no. 1, pp. 201–225, 1981.

[28] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos, "Snakes: Active contour models," *International journal of computer vision*, vol. 1, no. 4, pp. 321–331, 1988.

[29] J. Glimm, J. W. Grove, X. L. Li, K.-m. Shyue, Y. Zeng, and Q. Zhang, "Three-dimensional front tracking," *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 19, no. 3, pp. 703–727, 1998.

[30] G. Tryggvason, B. Bunner, A. Esmaeeli, D. Juric, N. Al-Rawahi, W. Tauber, J. Han, S. Nas, and Y.-J. Jan, "A front-tracking method for the computations of multiphase flow," *Journal of Computational Physics*, vol. 169, no. 2, pp. 708–759, 2001.

[31] M. Becker and M. Teschner, "Weakly compressible sph for free surface flows," in *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, 2007, pp. 209–217.

[32] B. Solenthaler and R. Pajarola, "Predictive-corrective incompressible sph," in *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 3, 2009, p. 40.

[33] S. Koshizuka, "A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation," *Comput. Fluid Dynamics Journal*, vol. 4, p. 29, 1995.

[34] S. Premžoe, T. Tasdizen, J. Bigler, A. Lefohn, and R. T. Whitaker, "Particle-based simulation of fluids," in *Computer Graphics Forum*, vol. 22, no. 3, 2003, pp. 401–410.

[35] M. Pauly, R. Keiser, B. Adams, P. Dutré, M. Gross, and L. J. Guibas, "Meshless animation of fracturing solids," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 24, no. 3, pp. 957–964, 2005.

[36] R. Keiser, B. Adams, D. Gasser, P. Bazzi, P. Dutré, and M. Gross, "A unified lagrangian approach to solid-fluid animation," in *Point-Based Graphics, 2005. Eurographics/IEEE VGTC Symposium Proceedings*, 2005, pp. 125–148.

[37] 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*, 2009, pp. 133–138.

[38] J. F. Blinn, “A generalization of algebraic surface drawing,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 1, no. 3, pp. 235–256, 1982.

[39] B. Adams, M. Pauly, R. Keiser, and L. J. Guibas, “Adaptively sampled particle fluids,” in *ACM SIGGRAPH*, 2007.

[40] R. Ando and R. Tsuruno, “A particle-based method for preserving fluid sheets,” in *ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on computer animation*, 2011, pp. 7–16.

[41] C. Dyken and G. Ziegler, “Gpu-accelerated data expansion for the marching cubes algorithm,” in *Proc. PGU Technology Conf*, 2010, pp. 115–123.

[42] R. Li and Y. Saad, “Gpu-accelerated preconditioned iterative linear solvers,” *The Journal of Supercomputing*, vol. 63, no. 2, pp. 443–466, 2013.

[43] F. H. Harlow and J. E. Welch, “Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface,” *The physics of fluids*, vol. 8, no. 12, pp. 2182–2189, 1965.

[44] C. Batty, F. Bertails, and R. Bridson, “A fast variational framework for accurate solid-fluid coupling,” in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 26, no. 3, 2007, p. 100.

[45] H. Bhatacharya, Y. Gao, and A. Bargteil, “A level-set method for skinning animated particle data,” in *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 2011, pp. 17–24.

[46] T. Jang, R. Blanco i Ribera, J. Bae, and J. Noh, “Simulating sph fluid with multi-level vorticity,” *International Journal of Virtual Reality*, vol. 10, no. 1, p. 21, 2011.

[47] B. Yang and X. Jin, “Turbulence synthesis for shape-controllable smoke animation,” *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 25, no. 3-4, pp. 465–472, 2014.

〈저자소개〉

김 종 현

- 2008년 세종대학교 컴퓨터학과 공학사
- 2010년 고려대학교 컴퓨터학과 공학석사
- 2016년 고려대학교 컴퓨터학과 공학박사
- 2013년–2016년 (주)텐일레븐 책임연구원
- 2016년–현재 강남대학교 소프트웨어응용학과 조교수
- 관심분야 : 물리기반 시뮬레이션, 가상현실, 지오메트리 프로세싱