

## Efficient Representation of Pore Flow, Absorption, Emission and Diffusion using GPU-Accelerated Cloth-Liquid Interaction

Jong-Hyun Kim\*

\*Associate Professor, College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology), Inha University, Incheon, Korea

### [Abstract]

In this paper, we propose a fast GPU-based method for representing pore flow, absorption, emission, and diffusion effects represented by cloth-liquid interactions using smoothed particle hydrodynamics (SPH), a particle-based fluid solver: 1) a unified framework for GPU-based representation of various physical effects represented by cloth-liquid interactions; 2) a method for efficiently calculating the saturation of a node based on SPH and transferring it to the surrounding porous particles; 3) a method for improving the stability based on Darcy's law to reliably calculate the direction of fluid absorption and release; 4) a method for controlling the amount of fluid absorbed by the porous particles according to the direction of flow; and finally, 5) a method for releasing the SPH particles without exceeding their maximum mass. The main advantage of the proposed method is that all computations are computed and run on the GPU, allowing us to quickly model porous materials, porous flows, absorption, reflection, diffusion, etc. represented by the interaction of cloth and fluid.

▶ **Key words:** Cloth-liquid interaction, GPU optimization, Pore flow, Absorption, Emission, Diffusion

### [요 약]

본 논문에서는 옷감과 입자 기반 유체 해법인 SPH(Smoothed particle hydrodynamics)를 이용한 액체 간의 상호작용으로 표현되는 다공성 흐름(Pore flow), 흡수, 방출 그리고 확산 효과를 GPU 기반으로 빠르게 표현할 수 있는 방법을 제안한다: 1) 옷감-액체의 상호작용에 의해 표현되는 다양한 물리적 효과를 GPU 기반으로 표현할 수 있는 통합형 프레임워크, 2) SPH 기반으로 노드의 포화도를 효율적으로 계산하고 이를 주변 Porous 입자들로 전달하는 방법, 3) 유체 흡수 및 방출 방향을 안정적으로 계산하기 위해 다르시 법칙(Darcy's law)을 기반으로 안정성을 개선시키는 방법, 4) Porous 입자들로 흡수되는 과정에서 유체의 흐름 방향에 따라 흡수되는 양을 조절하는 방법, 마지막으로 5) SPH 입자의 최대 질량이 넘지 않도록 방출할 수 있는 방법을 제시한다. 제안하는 방식의 가장 큰 장점은 모든 연산이 GPU에서 계산되고 동작하기 때문에 빠르게 옷감과 유체의 상호작용으로 표현되는 다공성 재질, 다공성 흐름, 흡수, 반사, 확산 등을 모델링할 수 있다.

▶ **주제어:** 옷감-액체 상호작용, GPU 최적화, 다공성 흐름, 흡수, 방출, 확산

- 
- First Author: Jong-Hyun Kim, Corresponding Author: Jong-Hyun Kim
  - \*Jong-Hyun Kim (jonghyunkim@inha.ac.kr), College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology), Inha University
  - Received: 2024. 04. 03, Revised: 2024. 06. 18, Accepted: 2024. 06. 18.

## I. Introduction

옷감-유체 상호작용은 현실에서 쉽게 볼 수 있는 물리 현상 중 하나이다. 젖은 옷감은 물리적으로 다양하고 복잡한 현상을 보여준다. 물이 옷감에 스며들면서 표면장력이 작용하여 물방울이 형성될 수 있고, 물의 흡수로 옷감의 무게가 늘어나는 현상도 나타난다. 이뿐만 아니라, 물의 존재로 인해 옷감의 질감이 변하거나 색상이 어두워지는 현상도 관찰할 수 있다[1,2]. 이러한 상호작용 현상을 구현하기 위해서는 옷감 또는 직물의 구성과 특징을 이해해야 한다. 옷감을 구성하는 직물은 얇은 섬유들이 모여 이루어진 개별적인 가닥으로 구성되어 있으며, 이러한 섬유 내부와 섬유 사이에서 액체가 흡수된다.

혼합물 이론(Mixture theory)에 따르면, 직물은 유체가 흐를 수 있는 연속적인 다공성 매질로 모델링될 수 있다[3]. 이 모델은 재료의 이방성 구조와 포화도의 변화를 설명하며, 부력, 항력, 표면장력 효과, 유체 대류 등을 표현할 수 있다. 본 논문에서는 질량-스프링 구조로 이산화된 옷감 시뮬레이션과 SPH 기반 유체 시뮬레이션을 GPU 환경에서 통합하여 상호작용을 표현할 수 있는 프레임워크를 제안한다. 본 논문에서 사용한 질량-스프링 구조 해법은 이전 기법을 활용했다[4,5].

본 논문에서는 물리 기반 유체 시뮬레이션과 옷감의 상호작용에 의해 나타나는 다양한 물리적 특성을 GPU 프레임워크에서 구현할 수 있는 프레임워크를 제안한다. 기존의 기법들은 특정 현상만을 모델링할 수 있었지만, 본 논문에서 제안하는 방법은 유체와 옷감의 상호작용 시 나타나는 다양한 물리적 특성을 하나의 GPU 프레임워크에서 구현할 수 있는 통합된 시뮬레이션 기법이다. 이를 통해 사용자는 빠르게 3D 장면을 모델링하고 제작할 수 있다.

## II. Related Work

액체가 젖은 상태에 대한 초기 연구는 평면 상에서 흐르는 페인트를 시뮬레이션하는 방법이 있다. Curtis et al.은 수채화 효과를 위해 종이 섬유에 얇은 물을 시뮬레이션하고 모세관 효과를 처리하기 위해 확산 방정식을 풀었다[6]. 이후 Chu와 Tai는 잉크와 침투 과정을 시뮬레이션 할 수 있는 정교한 시스템을 제안했다[7]. Huber et al.은 단순한 확산 흐름을 계산하는 대신 중력 항을 추가하여 천에 대한 픽(Fick)의 두 번째 법칙을 풀고 액체가 흡수되는 것을 시뮬레이션했다[1]. 유체와 고체의 상호 작용은 다방면

에 걸쳐 나타나는 현상이며 대부분은 개별적인 현상만 시뮬레이션한다. Ozgen et al.은 물에 잠긴 옷감의 변형을 제안했고[8], Chen et al.은 젖은 옷감의 모양을 잘 표현하기 위해 개선된 포화, 주름 및 마찰 모델을 제안했다[9]. Um et al.은 얇은 물 모델과 확산 방정식을 결합하여 동적인 옷감의 움직임과 액체의 흐름을 표현했다[10].

Lenaerts et al.은 습식 옷감 변형을 시뮬레이션하는 방법을 제안했다[11]. 그들은 다공성 매질 내부의 유체 흐름을 표현하기 위해 SPH 접근 방식을 사용했다. 마찬가지로 Rungjiratananon et al.은 SPH를 사용하여 유체와 동적 다공성 매질의 상호 작용을 시뮬레이션했다[12]. Saket과 Parag는 젖은 옷감 시뮬레이션을 SPH 모델 기반에서 효율적으로 풀 수 있는 기하학적 확산 방법을 제안했다[13]. Lin은 액체와 머리카락을 상호 작용할 수 있는 프레임워크를 설계하기 위해 SPH 기반 다공성 모델을 제안했다[14,15]. Fei et al.은 머리카락이 불침투성 물질이라고 가정하고 APIC(Affine Particle-In-Cell) 기반 액체 시뮬레이션을 사용하여 머리카락과의 상호작용을 표현할 수 있는 방법을 제안했다[2].

혼합물 이론은 비압축성 고체가 있는 포화된 다공성 매질을 위해 개발되었으며, 이는 다공성 고체와 액체 사이의 상호 작용을 포함한다. Abe et al.은 다공성 토양에서 크리프 유동(Creeping flow) 시뮬레이션을 표현하기 위해 MPM(Material point method)을 사용했다[16]. 이 방법을 확장하여 Bandara와 Soga는 큰 변형이 가능한 다공성 매질을 시뮬레이션할 수 있도록 액체의 탄성 효과를 고려한 알고리즘을 제안했다[17]. Daviet과 Bertails-Descoubes는 혼합물 이론과 Drucker-Pager 방식을 사용하여 침수된 모래 알갱이의 흐름을 시뮬레이션하기 위해 암묵적 비평형(Implicit non-smooth) 접근 방식을 사용했다[18]. 최근에 MPM을 기반으로 고체-유체 간의 상호작용을 할 수 있는 IQ-MPM이라는 방법이 제시했다[22]. 이들은 MPM기반으로 구성된 경계면에서 수치 손실로 인해 입자가 뭉치는 문제를 효율적으로 풀어냈다. 하지만 경계면에 나타나는 수치정확성 문제를 다루었지 실제로 상호작용에 의해 표현되는 물리적 특성을 다루진 않았다. 앞서 언급한 것처럼 이전 기법들은 젖은 상태에서 나타나는 개별적인 특징을 나타내려고 했지, GPU에서 젖은 옷감에서 나타나는 물리적 특징을 통합한 경우는 없었다. 본 논문에서는 젖은 상태에서 나타나는 재질의 변화와 특징을 GPU 친화적으로 구현할 수 있도록 각 알고리즘을 효율적으로 수정하고 이를 하나의 프레임워크로 통합할 수 있음을 보여준다.

### III. The Proposed Scheme

옷감과 강체의 입자 샘플링과 SPH 입자와의 상호작용은 Akinci *et al.*에서 제안한 방법을 이용했으며[19], 옷감에 샘플링된 입자는 Porous 입자라고 부르겠다. 자세한 내용을 설명하기에 앞서 표기법에 대해서 설명한다. 옷감의 노드는  $n$ , SPH 입자는  $f$ , Porous 입자는  $p$ 로 표기한다.  $V_i$ 는 경계 입자들일 경우에는 Akinci *et al.*이 제안한 방법으로 계산된 입자의 부피이고, SPH 입자일 경우에는  $\frac{m_i}{\rho_i}$ 를 의미한다.  $\phi$ 는 다공성 물질 내 고체의 공극률(Porosity)이고,  $s_i$ 는 다공성 물질 내 유체에 중 액체의 공극률이며, 나머지 표기법은 Table 1과 같다.

Table 1. Summary of notation used in this paper.

Symbol	Location	Meaning
$h_i$	Particle	Support radius
$r_i$	Particle	Radius
$x_i$	-	Position
$v_i$	-	Velocity
$v_{i,f}$	Pore particle	Pore flow
$V_i$	Particle	Volume
$m_i$	-	Total mass
$m_{i,f}$	Node, pore particle	Fluid mass
$m_{i,s}$	Node, pore particle	Solid mass
$w_i$	Pore particle	Barycentric coordinate
$\rho_i$	SPH, pore particle	Density
$\rho_i^0$	-	Rest density
$\Phi_i$	Node, pore particle	solid fraction
$s_i$	Node, pore particle	saturation

#### 1. Porosity Modeling

먼저 옷감이 흡수한 유체 질량은 옷감 메시의 노드(Node)에 저장한다. 그리고 옷감에 샘플링된 Porous 입자로부터 노드에서 흡수할 수 있는 최대 유체 질량을 계산한다. 그리고 이 값을 통해 노드의 포화도도 계산한다 (Fig. 1a 참조).

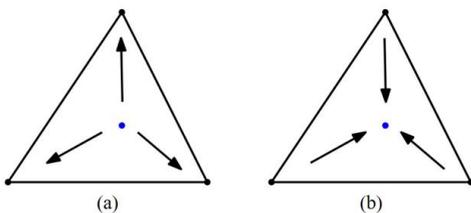


Fig. 1. Force transfer between porous particles and nodes in a triangle.

노드의 포화도는 이웃 페이스(Face)에 샘플링된 Porous 입자  $i$ 로부터 다음과 같이 계산한다 (수식 1과 2 참조).

$$m_{n,fmax} = \sum_i w_i (1 - \Phi_i) V_i \rho_f^0 \quad (1)$$

$$s_n = \frac{m_{n,f}}{m_{n,fmax}} \quad (2)$$

위 수식에서  $m_{n,fmax}$ 는 노드에서 흡수할 수 있는 최대 액체 질량을 의미한다.  $(1 - \Phi_i) V_i$ 는 Porous 입자 내 유체의 부피이고  $\rho_f^0$ 를 곱하게 되면 Porous 입자에서 흡수할 수 있는 최대 액체 질량이 된다. 여기에 노드에 대한  $i$ 의 무게중심 좌표인  $w_i$ 를 곱하고 모두 더하여 노드에서 흡수할 수 있는 최대 액체 질량을 계산한다. 이를 노드의 액체 질량에 나누면 노드의 포화도가 된다.

계산된 노드의 포화도를 주변에 샘플링된 Porous 입자로 보간하여 Porous 입자의 포화도를 계산한다 (Fig. 1b 참조). 아래와 같이 수식을 이용하여 Porous 입자의 포화도를 계산한다 (수식 3 참조).

$$s_p = s_0 w_0 + s_1 w_1 + s_2 w_2 \quad (3)$$

여기서 0~2는 입자들이 샘플링된 페이스가 가지고 있는 3개의 노드를 의미한다. 여기서  $w_{0,1,2}$ 는 삼각형의 무게중심 좌표이다.

#### 2. Pore Flow

유체의 흡수와 방출 방향을 계산하는 식은 다르시 법칙과 유사하게 모델링했다 (수식 4 참조).

$$v_p = -\frac{K_i}{\phi_i \mu} (\nabla P - \rho g) \quad (4)$$

다르시 법칙에서는 유체의 압력을 통해 계산이 되는데, 경계(Boundary) 입자 주변에서는 SPH 방향이 불안정하기 때문에 안정성을 높이기 위해서 SPH 입자가 없는 방향을 나타내는 식으로 알고리즘을 모델링한다. Bender *et al.*에서는 다르시 법칙을 기반으로 다공성 물질 내 유속을 중력과 압력을 통해 계산한다. 하지만 SPH기법을 통해 계산된 유체 입자의 압력은 불안정하다. 본 논문에서는 실제 입자의 압력을 대신할 가상의 압력을 이용하여 다공성 물질 내 유체흐름의 방향만을 계산하여 안정성을 개선시킨

다. Porous 입자의 가상 압력은 다음과 같이 계산한다 (수식 5 참조).

$$P = k^p \sum_i V_i \nabla W_{p,i} \quad (5)$$

위 수식에서  $i$ 는 Porous 입자의 이웃 SPH 및 Porous 입자를 제외한 경계 입자이고,  $k^p$ 는 사용자 지정 계수이다. 이 압력으로 유체의 흐름은 다음과 같이 계산한다 (수식 6 참조).

$$v_{p,f} = \frac{(P+g)}{\|P+g\|+\epsilon} \quad (6)$$

위 수식에서 분모에  $\epsilon$ 를 더해준 이유는  $\|P+g\|$  값이 0에 가까울 때는  $v_{p,f}$ 를 제로 벡터로 만들기 위해서이다.  $v_{p,f}$  값이 제로 벡터일 때는 Porous 입자와 SPH 입자 간의 흐름이 없다는 것을 나타낸다. 이렇게 계산된 유체 흐름은 물의 흡수에 영향을 준다.

### 3. Absorption

본 논문에서는 SPH 입자에서 Porous 입자들로 전달되는 질량을 SPH 접근법으로 새롭게 설계한다.

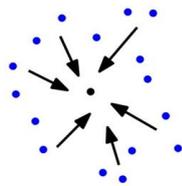


Fig. 2. Calculate the mass absorbed from SPH particles into porous particles (blue : SPH particle, black : porous particle).

SPH 입자가 Porous 입자에 접촉하면 Porous 입자에서 SPH 입자의 질량을 흡수하게 된다. 이때 SPH 입자  $i$ 에서 이웃 Porous 입자  $j$ 로 흡수되는 질량은 다음과 같이 계산한다 (수식 7 참조).

$$\Delta m_i = \sum_j k_j^a (s_{j,\max} - s_j + (s_{j,\max} - 1) \cos \theta_{ij}) V_j \nabla^2 W_{i,j} \quad (7)$$

여기서  $k_j^a$  ( $0 \sim 1$ )는 흡수 정도를 조절하는 상수이고,  $s_{j,\max}$  ( $1 \leq$ )는 Porous 입자가 흡수를 할 수 있는 최대 포화도를 의미한다. 이를 조절하여 유체가 옷감을 통과하는

정도를 조절할 수 있다. 그리고 앞서 계산한 Porous 입자가 유체의 흐름 방향에 따라 흡수되는 정도를 조절하기 위해서  $(s_{j,\max} - 1) \cos \theta_{ij}$ 를 새롭게 추가했다.  $(s_{j,\max} - 1) \cos \theta_{ij}$ 는 Porous 입자 내 유체 흐름에 대한 영향을 의미하고, 여기서  $\theta_{ij}$ 는  $x_i - x_j$ 와  $v_{j,f}$ 가 이루는 각이다. SPH 입자가 유체 흐름의 반대 방향에 위치한다면 Porous 입자의 포화도가 1까지만 흡수되기 때문에 통과하지 못하게 된다. 반대로 유체 흐름의 방향에 맞게 위치해 있다면  $1 - s_{j,\max}$  만큼 더 흡수된다.

그리고 마지막으로 Porous 입자로 흡수된 유체 질량을 노드로 보간하고 노드의 유체 질량에 더해준다.

질량 변화량  $\Delta m_i$ 이  $m_i - m_{f,\min}$ 보다 크거나 같다면 변화량은  $\Delta m_i$  대신  $m_i$ 가 된다.  $m_i$ 에  $\Delta m_i$ 를 빼주고  $m_i$ 가 0이 되면 SPH 입자를 시뮬레이션에서 제거하고 아니면 SPH 입자의  $h_i$ 와  $r_i$ 를  $\frac{m_i}{m_{f,\max}}$  비율로 수정해준다. 여기서  $m_{f,\min}$ 와  $m_{f,\max}$ 는 최소, 최대 SPH 입자의 질량이다. 계산된  $\Delta m_i$ 만큼  $j$ 로 전달하는데 수식에서 계산했을 때  $\Delta m_i$  값에 기여한 비율만큼 나눠준다. Porous 입자로 전달된  $\Delta m_i$ 는 옷감의 노드로 다음과 같이 전달된다 (수식 8 참조).

$$\Delta m_n = \sum_j w_j \Delta m_j \quad (8)$$

전달받은 노드에서는  $\Delta m_n$ 만큼  $m_{n,f}$ 를 더해주고 동시에 포화도도 수정해준다.

### 4. Emission

방출은 노드의 유체 질량이 최대 유체 질량보다 초과된 양을 주변 Porous 입자로 보간을 해준다. 이때 질량을 보존하기 위해서 노드 주변의 입자에서 계산된 무게중심좌표를 더한 값을 나누어주었다. 그리고 Porous 입자의 방출 방향에 SPH 입자가 있으면 SPH 입자의 최대 질량이 넘지 않도록 초과 질량을 전달한다. 그리고서도 남은 초과 질량이 SPH 입자의 최소 질량보다 크면 새로운 SPH 입자를 방출 방향에 새롭게 생성한다. 이때 방출 방향에 경계 입자가 있으면 방출하지 않았다. 그리고 그 경계 입자가 Porous 입자이면 초과 질량을 경계 입자로 전달한다. 마지막으로 초과 질량의 변화량을 흡수를 계산했을 때와 동일하게 노드로 보간하고, 노드의 유체 질량에 적용해준다. 좀 더 자세한 과정은 아래와 같다.

노드의 포화도가 1을 넘게 된다면 SPH 입자는 방출하게 된다. 먼저 노드에서 방출해야 하는 유체 질량인

$\Delta m_n = m_{n,f} - m_{n,fmax}$ 를 샘플링 된 Porous 입자  $i$ 에 다음과 같이 전달한다 (수식 9와 10 참조).

$$w_n = \sum_j w_j \quad (9)$$

$$\Delta m_i = w_0 \frac{\Delta m_0}{w_0} + w_1 \frac{\Delta m_1}{w_1} + w_2 \frac{\Delta m_2}{w_2} \quad (10)$$

수식 9에서  $j$ 는 노드의 이웃 페이스에 샘플링된 Porous 입자이다.  $\Delta m_i$ 를 계산한 후 Porous 입자  $i$ 와 이웃 SPH 입자  $j$ 의 상대적 위치와  $v_{i,j}$ 가 이루는 각이  $\theta^e$ 보다 작고,  $m_j$ 가  $m_{fmax}$ 보다 작으면  $j$ 에  $m_{fmax} - m_j$ 보다 적게 질량변화량을 전달한다. 그리고  $\Delta m_i$ 가  $m_{fmin}$ 보다 크면 남은 질량 크기의 SPH 입자들을  $v_{i,j}$ 방향으로 방출한다.

이때 방출한 방향과 이웃 바운더리 입자  $j$ 의 상대적 위치가 이루는 각이  $\theta^e$ 보다 작으면 방출하지 않는다. 바운더리 입자가 Porous 입자라면 남은 유체 변화량을 해당 입자의 질량변화량으로 전달한다. 최종적으로 질량변화량은 3.3절처럼 노드로 전달한다. SPH 입자가 방출되었을 때 고밀도 될 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 이전 기법에서 제안한 방법대로 일정 프레임동안 밀도와 속도를 제한하여 시뮬레이션을 안정시켰다[20].

## 5. Diffusion

마지막으로 확산은 먼저 흡수와 방출을 처리한 후에 포화도를 계산한다. 그리고 Porous 입자에서 확산되는 유체 질량 새롭게 계산하며, 좀 더 자세한 과정은 아래와 같다.

확산을 위한 계산 과정을 계산하기 위해 먼저 수식 3을 통해 흡수와 방출이 된 후 Porous 입자의 포화도를 계산한다. 같은 방법으로 노드의  $m_{n,f}$ 를 Porous 입자로 전달한다. 마지막으로 SPH 기법을 이용하여 확산을 계산한다.

Porous 입자  $i$ 가 이웃 Porous 입자  $j$ 로부터 확산으로 인한 질량 변화량은 다음과 같이 계산한다 (수식 11 참조).

$$\Delta m_i = -\Delta t m_{i,j} k_j^d (s_i - s_j + \eta^d \cos \theta_{ij}) V_j \nabla^2 W_{i,j} \quad (11)$$

위 수식에서  $k_j^d(0 \sim 1)$ 는 확산 정도를 조절하는 상수이고,  $\eta^d(0 \sim 1)$ 는 중력의 영향을 받는 정도를 조절하는 상수이다.  $\theta_{ij}$ 는  $x_i - x_j$ 와 중력이 이루는 각이다. 계산된 질량의 변화량은 앞서 했던 것처럼 동일하게 노드로 보간하고, 보간된 값을 노드의 유체 질량에 적용해준다. 이 확산 계산은 타임스텝이 너무 크거나 질량 변화량이 너무 크면 시뮬레이션이 불안정해지기 때문에 본 논문에서는 서브타임스텝 접근법을 이용하여 이 문제를 효율적으로 처리하였다.

## IV. Experiment and Results

본 연구의 결과를 생성하기 위해 인텔 코어 i7-7700K CPU, 32GB RAM 및 Geforce GTX 1080Ti GPU가 장착된 컴퓨터를 사용한 실험 환경을 활용했다. 본 논문에서 유체 시뮬레이션은 DFSPH(Divergence-free SPH) 기법을 사용하였으며, SPH 입자의 반지름이 다른 입자의 운동량 계산 방법은 이전 기법을 사용했다[21]. 젖었을 때 옷감이 서로 달라붙는 현상은 이전 기법에서 제시된 접착력을 활용하여 구현했다[14,15]. 적응형 타임스텝은 시뮬레이션을 불안정하게 만들기 때문에 사용하지 않았으며, 단일 타임스텝으로 계산했다. SPH만 계산할 때 발생하는 표면 관통 문제를 완화하기 위해 CCD(Continuous collision detection)를 사용했다.

본 논문에서 보여주는 결과에서 사용한 파라미터는 다음과 같이 설정했다 :  $k^p$ 는 16.8,  $k^e$ 는 0.01,  $k_j^d$ 는 0.1,  $s_{max}$ 는 1.18,  $\theta^e$ 는  $80.0^\circ$ ,  $\eta^d$ 는 0.01로 설정했다.

Fig. 3과 Fig. 4는 옷감 위에 물을 떨어뜨리고 던지는 장면이다. 이 장면들에서 사용한 옷감의 노드 개수는 14,569개이고, SPH 입자의 개수는 74,048개 이다.

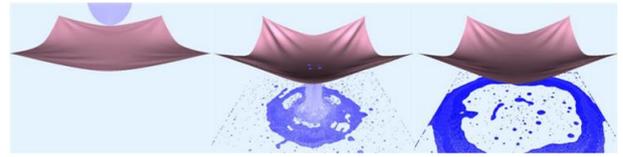


Fig. 3. Falling water on cloth.

액체가 고정된 옷감 표면 위로 떨어지면서 유체의 힘과 질량이 옷감으로 전달되어 옷감이 아래쪽으로 늘어지는 현상이 잘 표현되었다. 또한, 액체가 옷감에 흡수되면서 색이 변경되고, 초과된 액체는 아래로 떨어지는 물리적 현상이 잘 표현되었다. (Fig. 3 참조)



Fig. 4. Falling cloth on sphere and falling water.

Fig. 4는 액체 입자가 옷감 위로 떨어지면서 아래에 있는 구형 고체와 충돌하는 장면을 보여준다. 이 장면에서는 옷감이 고정되어 있지 않기 때문에 액체의 흡수로 인해 늘어지면서 옷감이 달라붙는 현상을 잘 표현하였으며, 유체

의 흡수량이 초과되어 물방울이 떨어지는 현상도 잘 표현되었다 (Fig. 3과 비교하여 확인할 수 있다).

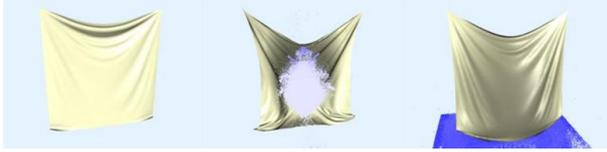


Fig. 5. Water injected from the side.

Fig. 5는 측면에서 유체 입자를 던지는 장면을 나타낸다. 이로 인해 옷감이 변형되고 표면이 늘어지는 현상이 잘 표현되었다. 이 장면을 구성하기 위해 18,199개의 옷감 노드와 405,224개의 SPH 입자를 사용했다. 액체와 옷감의 충돌로 인해 충격이 가해지면 옷감의 색상이 변하는 것도 확인할 수 있으며, 본 논문에서 보여주는 모든 결과에 대한 성능은 Table 2에 요약했다.

Table 2. Performance.

Figure	# of Nodes (Cloth)	# of SPH (Liquid)	Frame
3	14,569	74,088	0.3s
4	14,569	74,088	0.3s
5	18,199	405,224	1.2s

## V. Conclusion

본 논문에서는 물리 기반 유체 시뮬레이션과 옷감의 상호작용 시 표현되는 다양한 물리 현상인 다공성 흐름, 흡수, 방출 및 확산을 하나의 GPU 통합형 프레임워크를 통해 효율적으로 표현했다. 옷감-유체 상호작용을 GPU 기반에서 효율적으로 개발하기 위해 다음과 같은 방법들을 제안했다. 가장 큰 기여로는 옷감과 액체의 상호작용에 의해 표현되는 다양한 물리적 효과를 GPU 기반으로 표현할 수 있는 통합형 프레임워크를 제안했다. 그리고 SPH 기반으로 노드의 포화도를 효율적으로 계산하고 이를 주변 Porous 입자들로 전달하는 방법과 유체 흡수 및 방출 방향을 안정적으로 계산하기 위한 방법을 제시했다. 또한 Porous 입자들로 흡수되는 과정에서 유체의 흐름 방향에 따라 흡수되는 양을 조절하기 위해 SPH 기반으로 설계했으며, 마지막으로 SPH 입자의 최대 질량이 넘지 않게 방출할 수 있는 방법을 제시했다.

그러나 여전히 기반 시뮬레이션으로 2개의 동역학을 사용하고 있기 때문에 계산량이 많고, 모든 결과가 실시간으

로 보장되지 않는다. 시뮬레이션 결과에서 보여준 것처럼 장면의 복잡성에 따라 프레임 당 1초가 걸리는 경우도 있다. 향후 알고리즘을 입자 기반으로 통합하여 실시간으로 옷감-유체 상호작용을 자세히 표현할 수 있도록 알고리즘을 경량화할 계획이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00254695).

## REFERENCES

- [1] Huber, Markus, Simon Pabst, and Wolfgang Straßer. "Wet cloth simulation." In ACM SIGGRAPH 2011 Posters, pp. 1-1. 2011. DOI: 10.1145/2037715.2037726
- [2] Fei, Yun, Christopher Batty, Eitan Grinspun, and Changxi Zheng. "A multi-scale model for simulating liquid-fabric interactions." *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 37, no. 4, pp. 1-16. 2018. DOI: 10.1145/3197517.3201392
- [3] Lindsay, Bruce G. "Mixture models: theory, geometry, and applications." *Ims*, 1995.
- [4] Bender, Jan, and Dan Koschier. "Divergence-free smoothed particle hydrodynamics." In *Proceedings of the 14th ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on computer animation*, pp. 147-155. 2015. DOI: 10.1145/2786784.2786796
- [5] Bouaziz, Sofien, Sebastian Martin, Tiantian Liu, Ladislav Kavan, and Mark Pauly. "Projective dynamics: Fusing constraint projections for fast simulation." In *Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries, Volume 2*, pp. 787-797. 2023. DOI: 10.1145/2601097.2601116
- [6] Curtis, C.J., Anderson, S.E., Seims, J.E., Fleischer, K.W. and Salesin, D.H., August. Computer-generated watercolor. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 421-430. 1997. DOI: 10.1145/258734.258896
- [7] Chu, N.S.H. and Tai, C.L., Moxi: real-time ink dispersion in absorbent paper. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 24(3), pp.504-511. 2005. DOI: 10.1145/1073204.1073221
- [8] Ozgen, O., Kallmann, M., Ramirez, L.E. and Coimbra, C.F., Underwater cloth simulation with fractional derivatives. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(3), pp.1-9. 2010. DOI:

- 10.1145/1805964.1805967
- [9] Chen, Y., Magnenat Thalmann, N. and Foster Allen, B., Physical simulation of wet clothing for virtual humans. *The Visual Computer*, 28, pp.765-774. 2012. DOI: 10.1007/s00371-012-0687-y
- [10] Um, K., Kim, T.Y., Kwon, Y. and Han, J., Porous deformable shell simulation with surface water flow and saturation. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 24(3-4), pp.247-254. 2013. DOI: 10.1002/cav.1497
- [11] Lenaerts, T., Adams, B. and Dutré, P., Porous flow in particle-based fluid simulations. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(3), pp.1-8. 2008. DOI: 10.1145/1360612.1360648
- [12] Rungjiratananon, W., Szego, Z., Kanamori, Y. and Nishita, T., October. Real-time animation of sand-water interaction. In *Computer Graphics Forum*, 27(7), pp. 1887-1893, 2008. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2008.01336.x
- [13] Patkar, S. and Chaudhuri, P., Wetting of porous solids. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 19(9), pp.1592-1604. 2013.
- [14] **Lin, Wei-Chin.**, Coupling Hair with Smoothed Particle Hydrodynamics Fluids. *Workshop on Virtual Reality Interactions and Physical Simulations*, 2014. DOI:10.2312/vriphys.20141229
- [15] Lin, W.C., Boundary handling and porous flow for fluid-hair interactions. *Computers & Graphics*, 52, pp.33-42. 2015. DOI: 10.1016/j.cag.2015.06.005
- [16] Abe, K., Soga, K. and Bandara, S., Material point method for coupled hydromechanical problems. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(3), p.04013033. 2014. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001011
- [17] Bandara, S. and Soga, K., Coupling of soil deformation and pore fluid flow using material point method. *Computers and geotechnics*, 63, pp.199-214. 2015. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.09.009
- [18] Daviet, G. and Bertails-Descoubes, F., Simulation of Drucker-Prager granular flows inside Newtonian fluids. *Physics, Engineering, Environmental Science*, 2017.
- [19] Akinci, N., Ihmsen, M., Akinci, G., Solenthaler, B. and Teschner, M., Versatile rigid-fluid coupling for incompressible SPH. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 31(4), pp.1-8. 2012. DOI: 10.1145/2185520.2185558
- [20] Solenthaler, B. and Gross, M., Two-scale particle simulation. In *ACM SIGGRAPH*, pp. 1-8. 2011. DOI: 10.1145/1964921.1964976
- [21] Adams, B., Pauly, M., Keiser, R. and Guibas, L.J., Adaptively sampled particle fluids. In *ACM SIGGRAPH*, pp. 48. 2007. DOI: 10.1145/1276377.1276437
- [22] Fang, Yu and Qu, Ziyin and Li, Minchen and Zhang, Xinxin and Zhu, Yixin and Aanjaneya, Mridul and Jiang, Chenfanfu, IQ-MPM: an interface quadrature material point method for non-sticky strongly two-way coupled nonlinear solids and fluids, *ACM Transactions on Graphics*, 39(4), pp. 51, 2020. DOI: 10.1145/3386569.3392438

## Authors



Jong-Hyun Kim received the B.A. degree in the Department of Digital Contents at Sejong University in 2008. He received M.S. and Ph.D. degrees in the Department of Computer Science and Engineering at Korea University,

in 2010 and 2016. Prof. Kim is an Associate Professor in the College of Software and Convergence (Dept. of Design Technology) in Inha University. His current research interests include fluid animation and virtual reality.