

# 다상 유체 시뮬레이션에서 격자 크기 이하의 미세한 특징 표현을 위한 물리 기반 입자 기법

이호영<sup>†</sup>, 홍정모<sup>\*\*</sup>, 김창현<sup>\*\*\*</sup>

## 요 약

본 논문에서는 물리 기반 다상 유체 시뮬레이션의 정확성과 격자 크기 이하의 미세하고 사실적으로 아름다운 유체를 표현하기 위하여 이탈입자에 물리 기법을 추가하였다. 이탈 입자는 입자등위집합 기법에서 표시 입자들이 등위집합을 보정해 주고 남아 있는 입자들을 말하며, 본 논문은 이탈입자가 생성되는 방법을 기존과 다르게 하고, 미세한 공기방울을 표현한 양수의 이탈입자에서 견인력과 양력을 사용하여 유체 시뮬레이션을 확장하였다. 음수의 이탈입자는 또한 물방울과 스플래시 효과를 표현하였고, 등위집합의 음의 값과 합해지게 되면 그 노드의 속도에 영향을 주도록 설계하였다. 이렇게 양수의 이탈입자와 음수의 이탈입자를 사용하는 것은 유체 시뮬레이션에서 격자크기 이하의 상세함을 표현할 수 있고 역동적인 유체를 시뮬레이션할 수 있게 한다.

## A Physical-based Particle Method for Small Scale Feature in Multi-phase Fluid Simulation

Ho Young Lee<sup>†</sup>, Jeong Mo Hong<sup>\*\*</sup>, Chang Hun Kim<sup>\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

This paper presents a multi-phase fluid simulation that realistically represents small scale details. We achieve this by creating escaped particles based on physical methods. Escaped particles are the remained particles after correcting levelset. Generation of escaped particles in this paper differs from previous works; this fluid simulation is extended by adding lift force and drag force to positive escaped particles. And negative escaped particles represent droplet or splash effect; when they are merged into the negative levelset value, they affect the nodes' velocity (two-way coupling). This simulation that uses positive and negative escaped particles deals with detailed fluid motions dynamically in small scale.

**Key words:** Computer Graphics(컴퓨터그래픽스), Fluid Simulation(유체시뮬레이션), 3D Simulation(3차원시뮬레이션)

## 1. 서 론

가상 환경에서의 자연 현상을 시뮬레이션 하는 기술은 많은 멀티미디어 콘텐츠들에서 이용되고 있으

며, 특히 컴퓨터그래픽스 분야에서 많이 사용되는 기술인 유체 애니메이션은 간단하게 보이지만 이를 시뮬레이션 하는 것은 매우 복잡하고 쉽지 않은 일이다. 요즘 영화의 특수효과에서 유체 애니메이션 기술

※ 교신저자(Corresponding Author) : 김창현, 주소 : 서울특별시 성북구 안암동(136-701), 전화 : 02)3290-3574, FAX : 02)929-1917, E-mail : chkim@korca.ac.kr

접수일 : 2008년 9월 25일, 완료일 : 2008년 12월 29일

<sup>†</sup> 정회원, 고려대학교 컴퓨터학과 박사과정

(E-mail : flymist@korea.ac.kr)

<sup>\*\*</sup> 동국대학교 컴퓨터공학과 조교수

(E-mail : saden@korea.ac.kr)

<sup>\*\*\*</sup> 정회원, 고려대학교 컴퓨터학과 정교수

※ 이 연구에 참여한 연구자는 '2단계 BK21사업'의 지원비를 받았다. 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NO. R01-2008-000-20855-0)

이 첨가되어 영화의 질이 높아지는 경우를 많이 찾아 볼 수 있다.

유체 시뮬레이션은 실시간으로 정확성을 떨어뜨려 컴퓨터 게임이나 여러 가상 환경에서 사용될 수 있는 실시간 시뮬레이션 기법과 높은 품질의 유체 현상을 표현하기 위해 독립적으로 시뮬레이션 한 후, 나중에 가시화하는 비 실시간 시뮬레이션 기법이 있다. 본 논문에서는 유체의 사실성과 상세함에 초점이 맞춰져 있으므로 비 실시간 시뮬레이션 기반으로 진행하였다.

본 연구에서는 대류, 확산, 난류, 표면장력과 같은 복잡하게 상호작용하는 유체를 시뮬레이션 하였고, 지금까지의 유체 기술들 예를 들어, 공기방울과 물과의 다상 유체 시뮬레이션 [1], Splash [2], 강체와의 상호작용 [3] 등의 최신 기술들을 포함하였고 더 향상된 유체를 시뮬레이션 구현 하였다.

## 2. 관련연구

컴퓨터를 이용하여 수치적으로 유체를 풀이하는 전산유체역학에 대한 연구는 역사가 깊다. 클라우드 나비에 (1822)와 조지 스토크스 (1845)는 유체 운동에 관하여 나비에-스토크스 방정식을 정립하였으며, 그 식은 질량을 보존하는 연속 방정식과 운동량을 보존하는 운동량 방정식으로 나뉘져 있다.

### 2.1 격자 기반 기법

컴퓨터 그래픽스 분야에서 격자 기반 3차원 유체 시뮬레이션 연구는 포스터에 의해 최초로 시도 되었으며 [4], 이후 3차원 나비에-스토크스 방정식 [5-8]을 사용한 논문들이 연구되었다. 스템은 무조건적으로 안정적인 유체를 시뮬레이션 하기 위해 세미-라그랑지안 기법을 제안하였다[8]. 그리고 물과 공기의 경계 근처에서 등위집합과 입자들을 이용하여 표면을 보정해 주는 기술인 입자 등위집합 기법의 연구는 유체의 표면을 추적하는데 기여하였다[9,10]. 다상유체를 다루는 논문으로는 물 속 공기방울의 부력과 표면장력을 다루기 위해 VOF (Volume of Fluids) [11] 기법을 사용하여 수치적 소실을 막았고, Monotonic CIP는 보간 방식을 3차 근사함으로써 advection의 정확도를 높인 다상유체를 연구이다 [12]. GMF (Ghost Fluid Method)는 다른 두 유체가

표면에서 불연속 하다는 것을 다루어 다른 두 유체 사이의 표면 장력을 고려하였다[1]. 또한 강체와 유체와의 상호작용을 다룬 결과들도 있었다[3,13].

### 2.2 입자 기반 기법

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)는 천체물리학 분야에서 부드러운 커널을 이용하여 격자화되지 않은 공간에서 밀도와 속도를 가진 입자를 이동시키는 것에서 시작되었다[14,15]. 호트러진 객체들을 입자체계로 모델링 한 연구가 있었고 [16], 분자 역학과 점성력을 입자체계에 추가하여 녹는 효과는 연구도 있었다[17,18]. 물리는 객체의 재질에 따라 탄성력과 형성력이 있는 유체 애니메이션이 가능하도록 입자체계를 고안 하였다[19]. 그리고 입자들 사이의 접촉에 대한 특징을 부여하고 이완 기법으로 점성 유체를 표현 한 연구도 있었다 [20]. 데스브룬은 부드러운 객체의 애니메이션을 위해 SPH [21]를 사용 하였으며, 물리는 SPH를 이용하여 액체의 시뮬레이션과 렌더링을 표현하는데 기여하였다[22]. 보통 입자기법은 양함수로 시뮬레이션이 되지만 MPS (Moving-Particle Semi-Implicit) 기법을 이용하여 나비에-스토크스 방정식을 음함수로 풀 연구도 있었다[23].

## 3. 유체 전산 물리

### 3.1 유체 방정식

나비에-스토크스 방정식은 비압축성 유체를 정확하게 시뮬레이션 해주며, 아래의 방정식은 질량과 운동량을 보존하는 나비에-스토크스 방정식이다.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\vec{u}_t = -(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} + \nabla \cdot (\nu \nabla \vec{u}) - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f} \quad (2)$$

위의 방정식에서  $\vec{u}$ 는 (u,v,w) 속도이며,  $\vec{u}_t$ 는 시간에 대한 유체 속도의 미분,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 밀도,  $\nu$ 는 점성,  $\vec{f}$ 는 외력이다. 나비에-스토크스 방정식을 풀이하는 방법은 두 단계로 나뉘진다. 먼저 압력을 고려하지 않고 중간 단계의 속도( $\vec{u}^*$ )를 구한다.

$$\vec{u}^* = \vec{u} + \Delta t [ -(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} + \nabla \cdot (\nu \nabla \vec{u}) + \vec{f} ] \quad (3)$$

다음으로 비압축성 유체라는 제약 조건을 맞추기

위하여, 새롭게 구할 속도( $\vec{u}_n$ )를 식 (5)를 이용하여 다이버전스 프리하게 하는 압력을 구한다.

$$\vec{u}_n = \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}_n = \nabla \cdot \vec{u} - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla \cdot (\nabla p) = 0 \quad (5)$$

최종적으로 구한 압력과 밀도, 중간 단계의 속도( $\vec{u}$ )를 식 (4)를 이용하여 다음 타임스텝의 속도  $\vec{u}_n$ 를 얻어낸다.

### 3.2 입자 등위집합 기법

먼저 등위집합 기법은 유체의 표면을 표현하기 위해 격자에서의 부호가 표시된 거기함수의 값을  $\phi$ 로 나타낸 음함수 표현 기법이다. 일반적으로 셀의 중앙에 위치시키며,  $\phi=0$  이면 물의 표면을,  $\phi<0$  이면 물을,  $\phi>0$  이면 공기를 나타내는데 격자의  $\phi$ 값을 조정하여 간단하게 유체의 표면을 제어 할 수 있다. 등위 집합은 쉽게 부드러운 표면을 만들 수 있고 임의의 한 지점의 정보를 쉽게 보간 하여 얻을 수 있다는 장점을 가진다. 속도  $\vec{u}$ 에 의해 등위 집합  $\phi$ 가 시뮬레이션에서 대류 되는 것은 식 (6)과 같으며, 식 (6)을 수치적으로 풀기 위하여 세미-라그랑지안 기법을 사용한다.

$$\phi_t = \vec{u} \cdot \nabla \phi \quad (6)$$

입자 등위집합 기법은 격자기반에 대류 과정 중에 소실되는 부분을 보정해 주기 위해 [9]의 격자기반 등위집합기법에 입자를 혼합하는 방법을 제안하였으며, 유체의 격자크기 이하에서의 상세함을 유지하는데 기여하였다.

## 4. 물방울과 공기방울의 역학

### 4.1 물방울과 공기방울 입자의 생성

격자기반 시뮬레이션에서는 격자 크기의 제한으로 최하위 셀보다 작은 상세함, 예를 들어 공기방울이나 물방울이 하나의 격자크기보다 작은 경우 수치적 소실이 발생한다. 이번 장에서는 격자로서 표현할 수 없을 정도의 크기를 가진 부분의 유체를 입자를 이용하여 표현하는 방법을 소개한다. [12]에서는 Smearred Heaviside 함수를 이용하여 격자크기 이하

에서 소실되는 지역을 찾고 그 지점을 입자로 변환한 후에 입자기법으로 물방울 또는 공기방울을 시뮬레이션 하여 소실 뿐만 아니라 유체의 역동적인 사실성도 자세하게 표현하였다. [2]에서는 입자 등위집합 기법에서 등위집합을 보정하고도 여전히 남아 있는 이탈 입자를 물 입자로 정의하고 몬테카르로 기법으로 구한 부피를 소실된 부분의 입자 반지름으로 저장하고 물리적 입자체계에 의해 시뮬레이션 하였다.

본 논문에서는 이탈 입자 생성 조건을 아래와 같이 바꾸어 기존의 논문들과 차이를 두었으며 그 결과 스플래시의 사실적 표현력을 향상시켰다.

조건 1. 입자 등위집합 기법에서 표시 입자의 이전 단계 속도와 현재 단계의 속도를 비교하여 큰 표시 입자를 이탈 입자로 정의한다.

조건 2. 조건1에서 정의된 이탈 입자 가운데 속도가 느린 경우와 표면과 멀리 떨어져 있는 경우는 제외한다.

조건 3. 양수의 이탈입자의 속도와 그 지점의 노멀 속도의 내적은 0 이상이며, 음수의 이탈입자의 속도와 그 지점의 노멀 속도의 내적은 0이하이다.

### 4.2 물방울과 공기방울 입자의 역학 모형

먼저 공기방울 입자는 일반적인 입자 기반 물리 시스템으로 풀었으며 유체와의 상호작용을 위해 다음 식으로 구한다.

$$\vec{v}_n = \vec{v}_n + d^* \vec{v}_p \quad (7)$$

$\vec{v}_n$ 는 입자를 포함하고 있는 노드의 속도이며, 3차원의 경우 하나의 격자 당 8번의 계산을 해줘야 하고,  $d$ 는 물방울이 해당 격자에 영향을 미치는 정도를 나타내는 계수이다.  $\vec{v}_p$ 는 입자의 속도이다. 식 (7)은 입자가 격자의 속도에 영향을 주어 격자기반과 입자기반의 시뮬레이션 사이에 양방향으로 서로 영향을 주는 것이 가능하다.

일반적인 입자체계에 의해 물방울을 표현하는 양수의 이탈입자와 달리 공기방울을 표현하는 음수의 이탈입자는 [24]에 제안된 공기방울 역학으로 시뮬레이션 한다.

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_p + \vec{F}_d + \vec{F}_l \quad (8)$$

중력  $\vec{F}_g = \rho V \vec{g}$  이며  $\rho$ 는 밀도,  $V$ 는 부피,  $\vec{g}$ 는 y축으로 하강시키는 중력 벡터이다. 압력  $\vec{F}_p = -V \nabla p$  이

고 여기서  $p$ 는 압력이다. 견인력  $\vec{F}_v = -\frac{1}{2}\pi R^2 \vec{v} - \vec{u}(\vec{v} - \vec{u})$  이고 여기서  $\vec{v}$ 는 입자의 속도이고,  $\vec{u}$ 는 입자의 위치에서의 격자상의 속도,  $R$ 은 입자의 반지름이다. 마지막으로 양력은  $\vec{F}_l = -\rho V(\vec{v} - \vec{u}) \times \nabla \times \vec{u}$  이다.

위의 힘들 중 견인력은 유체와 공기방울의 인력을 나타내는 힘으로 공기방울의 속도를 물의 속도가 상쇄 시키고 유체의 속도와 공기방울의 속도가 사실적으로 상호작용 되도록 시뮬레이션 해준다. 양력은 유체와 공기방울의 속도가 위의 식과 같이 결합되어 공기방울 입자들이 회전력을 가지고 돌면서 상승하게 되게 하는 힘이다. 양력에서 회전력 curl은 아래의 식으로 이산화 하여 푼다.

$$\nabla \times \vec{v} = \hat{x} \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + \hat{y} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \hat{z} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$$

### 5. 결 과

본 논문은 아래와 같은 환경에서 2차원과 3차원 유체 시뮬레이션을 수행하였다.

프로세서	Intel Core2 CPU 2.40
메모리	2GB RAM
그래픽카드	NVIDIA GeForce 7900 GTX
기타	Window PC, Visual Studio, OpenGL, C++

#### 5.1 2차원 예

그림 1의 적색 입자는 공기방울을 흰색 입자는 물방울을 표시한다. 적색 입자를 보면 꼬리모양이 팽글 팽글 돌면서 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 견인력과 양력이 공기방울 입자에 적용되기 때문에 발생하는 현상이다.

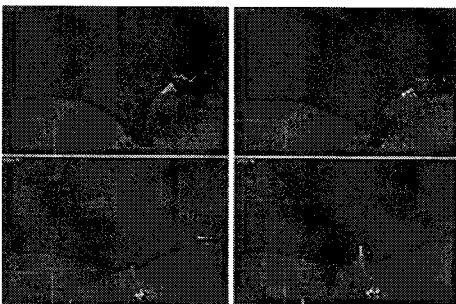


그림 1. 2차원 스플래시(흰색 입자), 공기방울(적색 입자) 실험

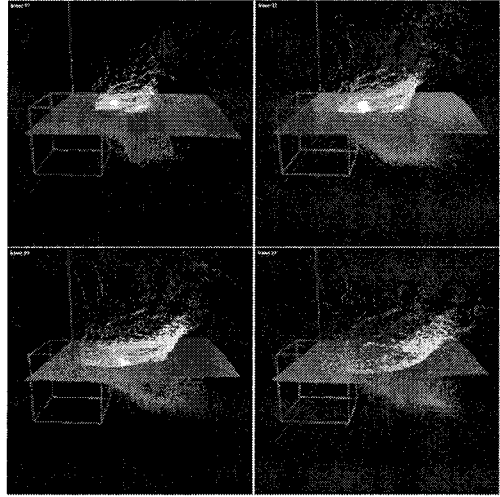


그림 2. 3차원 스플래시 (하늘색 입자), 공기방울 (적색입자) 실험

#### 5.2 3차원 예

그림 2는 하늘색 입자인 물방울이 스플래시 효과를 발생시킨다. 물방울 입자들은 4.1의 조건에 따라 생성이 되므로 이전 연구 결과보다 날카로운 스플래시 현상을 관찰 할 수 있다.

#### 5.2 이전 연구와 비교

그림 2는 물체가 표면을 치는 순간에 발생하는 첫 번째 스플래시 현상을 담은 화면인 반면에 그림 3은 물체가 물 표면을 지나 입수한 후에 두 번째 스플래시 현상을 담은 것이다. 빨간색 입자들이 스플래시를 표현한 물방울 입자들이며 그림 3의 경우 본 논문의 기법으로 스플래시가 날카롭게 생성되는 반면에 그림 4의 경우 기존의 기법 [2]으로 스플래시의 날카

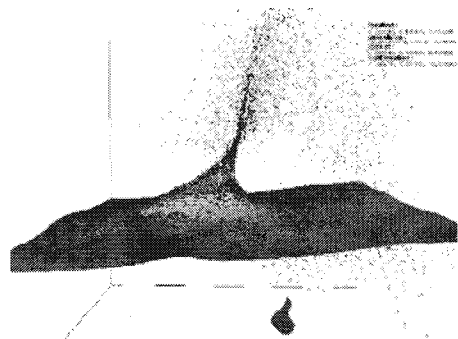


그림 3. 본 연구의 날카로운 스플래시

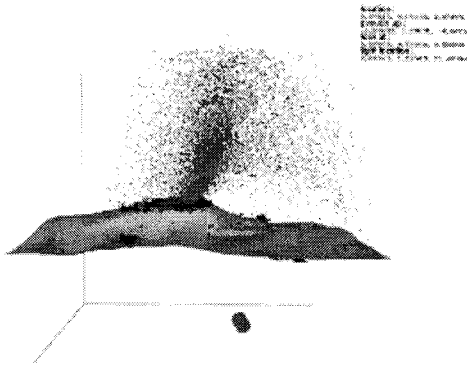


그림 4. 이전 연구 [2]의 스플래시

로움이 덜 한 것을 관찰 할 수 있다. 이러한 차이를 보이는 이유는 우리의 기법이 등위집합을 보정하는 과정에서 해당 타임스텝 이후에 등위집합의 보정 역할을 할 가능성이 있는 입자들을 이탈입자로 생성시키지 않고 표시입자로 남겨 두게 되어 스플래시 현상의 시각적 사실성을 향상시켰다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 격자기반의 유체시뮬레이션에 두 가지 다른 입자들을 사용하여 유체를 더 사실적이고 상세하게 표현하였다. 첫 번째 입자는 등위집합을 보정해 주는 표시 입자이며, 두 번째 입자는 스플래시나 공기방울을 격자이하의 지역에서 표현한 이탈입자이다. 이 논문의 기여점은 첫 번째로 양수의 이탈입자를 이용하여 격자이하 크기의 공기방울을 표현할 때 견인력을 사용하여 공기방울들이 부력에 의해 상승하면서 팽글팽글 돌게 한 것이다. 두 번째는 이탈입자들을 생성할 때 세 가지 조건을 주어 기존의 입자 보다 더 역동적인 스플래시 현상을 표현할 수 있었다. 향후 연구 과제로는 이탈 입자에 SPH 기법을 사용하여 기존의 입자체계에서 보여 줄 수 없었던 유체의 성질을 SPH로 표현하는 것이다.

## 참 고 문 헌

[1] Hong, J.-M., and Kim, C.-H., "Discontinuous fluids," *ACM Trans Graph. (SIGGRAPH Proc.)*, Vol.24, No.3, pp. 915-919, 2005.  
 [2] J. H Kim, D. H Cha, B. J Chang, B. K Koo,

and I. S Ihm, "Practicle Animation of Turbulent Splashing Water," *Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, 2006.

[3] Mark Carlson, Peter J.Mucha, and Greg Turk, "Rigid Fluid: Animating the Interplay Between Rigid Bodies and Fluid," *ACM Transactions of Graphics(Proceedings of SIGGRAPH 2004)*, Vol.23, No.3, pp. 377-384, 2004.  
 [4] Foster, N., and Metaxas, D., "Realistic animation of liquids," *Graphical Models and Image Processing*, Vol.58, No.5, pp. 471-483, 1996.  
 [5] Fedkiw, R., Stam, J., and Jensen, H., "Visual simulation of smoke," *In Proc. of ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 15-22, 2001.  
 [6] Foster, N., and Metaxas, D., "Controlling fluid animation," *In Comput. Graph. Int.*, pp. 178-188, 1997.  
 [7] Foster, N., and Metaxas, D., "Modeling the motion of a hot, turbulent gas," *In Proc. of SIGGRAPH 97*, pp. 181-188, 1997.  
 [8] Stam, J., "Stable fluids," *In Proc. of SIGGRAPH 99*, pp121-128, 1999.  
 [9] Enright, D., Marschner, S., and Fedkiw, R., "Animation and rendering of complex water surfaces," *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Proc.)*, Vol.21, No.3, pp. 736-744, 2002.  
 [10] Foster, N., and Fedkiw, R., "Practical animation of liquids," *In Proc. of ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 23-30, 2001.  
 [11] Hong, J.-M., and Kim, C.-H., "Animation of bubbles in liquid," *Computer Graphics Forum (Eurographics 2003 Proceedings)*, Vol.22, No. 3, pp. 253-262, 2003.  
 [12] Song, O.-Y., Shin, H.-C., and Ko, H.-S., "Stable but non-dissipative water," *ACM Transactions on Graphics*, Vol.24, No.1, pp. 81-97, 2005.  
 [13] Takahashi, T., Fujii, H., Kunimatsu, A., Hiwada, K., Saito, T., Tanaka, K., and Ueki, H., "Realistic animation of fluid with splash

and foam," *Comp. Graph. Forum (Eurographics Proc.)*, Vol.22, No.3, pp. 391-400, 2003.

[14] Gingold R., and Monaghan J., "Smoothed particle hydrodynamics. theory and application to nonspherical stars," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol.181, pp. 375, 1977.

[15] Lucy L., "A numerical approach to the testing of the \_ssion hypothesis," *Astronomical Journal*, Vol.82, pp. 1013, 1977.

[16] Reeves W. T., "Particle systems . a technique formodelling a class of fuzzy objects," *In SIGGRAPH (1983)*, pp. 359-376, 1983.

[17] Miller G., and Pearce A., "Globular dynamics: A connected particle system for animating viscous fluids," *Computers & Graphics*, Vol. 13, No.3, pp. 305-309, 1989.

[18] Premoze S., Tasdizen T., Bigler J., Lefohn A., and Whitaker R. T., "Particle-based simulation of fluids," *Computer Graphics Forum*, Vol.22, No.3, pp. 401-410, 2003.

[19] Reeves W. T., "Particle systems . a technique formodelling a class of fuzzy objects," *In SIGGRAPH (1983)*, pp. 359-376, 1983.

[20] Steele K., Cline D., Egbert P. K., and Dinerstein J., "Modeling and rendering viscous liquids," *Journal of Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol.15, No.3-4, pp. 183-192, 2004.

[21] Desbrun M. and Gascuel M.-P., "Smoothed particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies," *In Computer Animation and Simulation '96*, pp. 61-76, 1996.

[22] Müller M., Charypar D., and Gross M., "Particle-based \_uid simulation for interactive applications," *In SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation(2003)*, pp. 154.159, 2003.

[23] Premoze S., Tasdizen T., Bigler J., Lefohn A., and Whitaker R. T., "Particle-based simulation of fluids," *Computer Graphics Forum*, Vol.22, No.3, pp. 401-410, 2003.

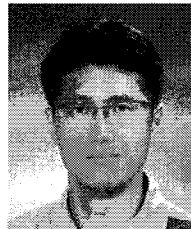
[24] D. Darmana, N.G. Deen, and J.A.M. Kuipers, "Parallelization of an Euler-Lagrange model using mixed domain decomposition and a mirror domain technique: Application to dispersed gas-liquid two-phase flow," *Journal of Computational Physics*, Vol.220, pp. 216-248, 2006.



**이 호 영**

2006년 한국기술교육대학교 전자공학과 공학사  
 2008년 고려대학교 컴퓨터학과 이학석사  
 2008년 3월~현재 고려대학교 컴퓨터학과 박사과정

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 물리 기반 시뮬레이션



**홍 정 모**

2000년 한국과학기술원 기계공학과 학사  
 2002년 한국과학기술원 기계공학과 석사  
 2005년 고려대학교 컴퓨터학과 박사  
 2008년 9월~현재 동국대학교 컴퓨터공학과 조교수

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 물리 기반 시뮬레이션



**김 창 현**

1979년 고려대학교 경제학과 학사  
 1988년 University of Tsukuba 전자정보 박사  
 1995년 3월~현재 고려대학교 컴퓨터학과 교수  
 2005년 11월~현재 고려대학교 컴퓨터과학기술대학원 원장

2008년 3월~현재 한국컴퓨터그래픽스학회 회장  
 관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 물리 기반 시뮬레이션, Mesh Processing