

전산유체역학을 이용한 실시간 유체 애니메이션 기술

강문구[†]

Real-time Flow Animation Techniques Using Computational Fluid Dynamics

Moon Koo Kang

Abstract. With all the recent progresses in computer hardware and software technology, the animation of fluids in real-time is still among the most challenging issues of computer graphics. The fluid animation is carried out in two steps - the physical simulation of fluids immediately followed by the visual rendering. The physical simulation is usually accomplished by numerical methods utilizing the particle dynamics equations as well as the fluid mechanics based on the Navier-Stokes equations. Particle dynamics method is usually fast in calculation, but the resulting fluid motion is conditionally unrealistic. The methods using Navier-Stokes equation, on the contrary, yield lifelike fluid motion when properly conditioned, yet the complexity of calculation restrains this method from being used in real-time applications. This article presents a rapid fluid animation method by using the continuum-based fluid mechanics and the enhanced particle dynamics equations. For real-time rendering, pre-integrated volume rendering technique was employed. The proposed method can create realistic fluid effects that can interact with the viewer in action, to be used in computer games, performances, installation arts, virtual reality and many similar multimedia applications.

Key Words : real time fluid animation (실시간 유체 애니메이션), continuum analysis (연속체 해석), particle dynamics (입자동역학), pre-integrated volume rendering (선적분 볼륨 렌더링)

1. 서 론

컴퓨터 그래픽을 이용한 애니메이션에서 최근 활발한 연구가 이루어지는 분야 중의 하나는 물, 불, 연기 등의 불규칙한 운동을 사실적으로 표현하는 유체 애니메이션이다. 최근 3차원 게임 등의 응용 분야에서 실시간 유체 애니메이션의 필요성이 크게 증가하고 있으나, 유체는 움직임이 불규칙하여 사실적인 애니메이션이 어렵고, 특히 이를 실시간으로 애니메이션 하는 것은 더욱 어렵다⁽¹⁻⁴⁾.

기존의 유체 애니메이션 방법을 실시간 응용에 적용하기 위해서는 몇 가지 문제점들이 존재한다. 첫 번째 제약 요인은 물리적 시뮬레이션의 연산 시간이다.

사실적인 유체 애니메이션을 위해서는 Navier-Stokes 방정식을 이용한 수치해석적 방법들이 많이 사용되고 있다. 이러한 방법을 이용하여 정교한 유체의 움직임을 표현할 수 있으나 복잡한 유체의 운동을 시뮬레이션하기 위해서는 많은 격자가 필요하여 오랜 연산 시간이 소요된다. 또 한가지 방식은 입자동역학 방정식을 사용하여 유체의 움직임을 근사적으로 표현하는 방법이다. 이 방식은 Navier-Stokes 방정식에 비해 수학적으로 단순하고 연산의 속도가 빠른 장점이 있으나, 유체 운동의 다양한 특성을 충분히 반영하기 어려운 단점을 가지고 있다⁽⁶⁾.

두 번째 제약 요인은 시각적 렌더링에 소요되는 연산 시간이다. 포톤 사상법(Photon mapping) 등을 이용한 전역적 조명 방법(global illumination)은 높은 품질의 사실적 렌더링을 구현할 수 있으나 이를 위해 오랜 연산 시간이 소요된다⁽⁵⁾.

[†]서울대학교 전기컴퓨터공학부 BK21정보기술사업단
moonkang@ee.snu.ac.kr

최근에는 이러한 제약 요인들을 효과적으로 극복하기 위해 여러 가지 기법들이 개발되고 있다. 물리적 시뮬레이션 방법으로 입자 동역학 방식의 해석기법과 Navier-Stokes 방정식을 이용한 연속체 해석기법을 적절히 조합한 혼합방식을 채택할 경우 빠른 연산속도와 사실적인 유체의 운동을 동시에 얻을 수 있다^(17,18). 렌더링 방법으로는 선적분 볼륨 렌더링(*pre-integrated volume rendering*) 방식이 빠른 속도와 우수한 시각적 품질을 동시에 제공한다⁽⁷⁾. 선적분 볼륨 렌더링은 적은 양의 시뮬레이션 데이터로도 슬라이스 보간 기법에 의해 고속으로 고화질의 영상을 얻을 수 있다. 또한, 시뮬레이션과 렌더링 인자를 실시간으로 조절할 수 있어 사용자가 유체의 입자적 특성과 연속체적 특성을 임의로 조정할 수 있게 되므로, 애니메이션적인 과장과 생략이 가능하며 표현의 범위가 넓어진다.

최근의 유체 애니메이션 기술은 연산의 안정성을 높이고 연산속도를 개선시키는 방향으로 많은 연구가 이루어지고 있다. Foster⁽¹⁾는 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 적용하여 유체의 유동을 물리적으로 시뮬레이션하였다. Stam⁽²⁾은 역학적인 엄밀성을 회생하고 큰 시간 증분에 대해서도 Navier-Stokes 방정식을 안정적으로 풀 수 있는 방법을 제시하였으며, 물리현상의 엄밀한 재현보다는 시각적으로 다양하고 역동적인 영상을 효과적으로 산출해야 하는 유체 애니메이션의 특성을 잘 반영하였다. Foster⁽³⁾는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 사실적인 유체의 움직임을 음함수면(*implicit surface*) 방법으로 가시화하였다. Enright⁽⁴⁾는 이 방법을 발전시켜 동적 음함수면(*dynamic implicit surface*) 방식과 입자 레벨 세트(*particle level set*) 방식을 조합하였다. 렌더링 기법으로는 물리적 몬테 카를로 광선 추적법(*physically-based Monte Carlo ray tracer*)을 기초로 한 포톤 사상 방법을 사용하여 사실감을 더하였다. 그러나 이상의 방법들은 우수한 사실감을 제공하는 반면 유동의 시뮬레이션과 렌더링에 많은 연산 시간이 소요되므로 실시간의 적용은 용이하지 않다.

한편, 입자 동역학에 기반을 둔 시뮬레이션 기법을 사용할 경우 비교적 신속한 유체 시뮬레이션이 가능하다. 특히 입자 사이의 인력과 척력을 Lennard-Jones 포텐셜 모델로 근사하여 입자의 운동을 해석하는 기법들이 많이 사용되고 있다⁽⁶⁾. Miller⁽⁸⁾는 점성 을 갖는 유체를 표현하기 위해 입자들 사이에 스프링

요소를 연결하는 모델을 제안하였다. Terzopolous⁽⁹⁾는 분자 역학적인 개념을 적용하여 입자 간 상호작용을 모델링 하였다. 그러나 이러한 방법들을 사용할 경우에도, 적은 수의 입자를 사용하면 실시간에 가까운 속도로 애니메이션이 가능하나 그 결과로 얻어지는 유체의 움직임이 다소 부자연스럽고, 입자의 수가 증가할수록 입자 간 연결고리가 지수 함수적으로 증가하게 되어 긴 연산 시간이 소요된다. 따라서 이를 실시간에 적용하려면 큰 부피를 가진 유체의 움직임보다는 잘게 부서져서 흘어지는 유동을 표현하기에 적합하다.

실시간 유체 애니메이션은 유동 방정식의 연산 속도뿐만 아니라 렌더링 속도에 의해서도 크게 좌우된다. 유체는 그 표면 형상이 복잡하고 빛을 반사시키거나 투영시키는 등의 복잡한 광학적 현상을 수반하므로 고성능의 렌더링 알고리즘을 필요로 한다. Jensen⁽⁵⁾이 제안한 포톤 사상 법(*photon mapping*)은 최근의 유체 애니메이션에 많이 사용되고 있다. 이 방법은 유체의 광학적인 특성을 잘 반영한 우수한 품질의 영상을 제공할 수 있으나, 한 프레임의 영상을 만들기 위해서 수분의 시간이 소요되어 실시간 응용에는 부적합하며, 시간의 제약을 받지 않는 비실시간 유체 애니메이션 분야에 주로 사용되고 있다. 불규칙한 형상의 변화가 존재하는 문제에 효과적 적용이 가능한 볼륨 렌더링 기법은 Levoy⁽¹⁰⁾에 의해 제안된 광선 투영법(*ray casting*)으로부터 시작되었다. 볼륨 렌더링은 데이터 처리량이 많으므로 공간 도약법^(11,12)이나 조기 광선 중단법⁽¹³⁾ 등을 적용하여 이를 가속하였다. 또한, 그래픽스 하드웨어의 발달에 따라 하드웨어 텍스쳐를 볼륨 렌더링의 가속에 이용하는 기술이 제안되고 있다⁽¹⁴⁾.

최근에는 입자동역학 해석기술 및 Navier-Stokes 방정식을 이용한 사용한 고속의 유체 시뮬레이션 기법이 개발되고 있으며, 하드웨어 텍스쳐 가속 기술을 적용한 선적분 볼륨 렌더링 방식기법을 통해 실시간 유체 애니메이션이 가능해졌고 점차 그 시각적 품질과 성능이 개선되고 있다.

2. 실시간 유동 시뮬레이션

2.1 입자동역학 방식

입자동역학 방식의 유체 애니메이션에서는 유체의 운동을 다수의 입자의 운동으로 근사화하고 입자 사

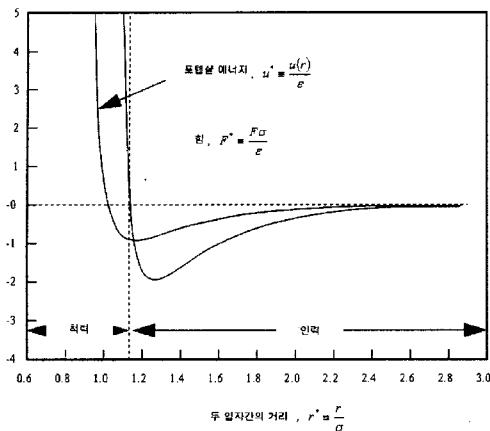


Fig. 1. 레나드-존스 포텐셜과 입자간 상호작용력.

이의 상호작용력을 여러 가지 모델을 사용하여 표현한다. 대표적인 예로서 Fig. 1과 같은 레나드-존스 (Lennard-Jones) 모델이 많이 사용된다.

입자의 유효반경에 비해 훨씬 큰 거리만큼 떨어진 입자들 사이에서는 충돌의 확률이나 인력의 세기가 미약하므로 각 입자들을 경구(hard sphere)로 가정하고 단순 충돌모델로 대체함으로써 물리적 사실감을 크게 저하시키지 않으면서도 연산부하를 크게 줄일 수 있다.

입자동역학 방정식을 사용하여 Fig. 2와 같은 유체의 운동을 시뮬레이션 할 수 있다.

위의 입자동역학 해석 결과를 렌더링하여 가시화하면 다음과 같은 이미지들을 얻을 수 있다.

2.2 연속체 개념의 유체역학적 해석기법

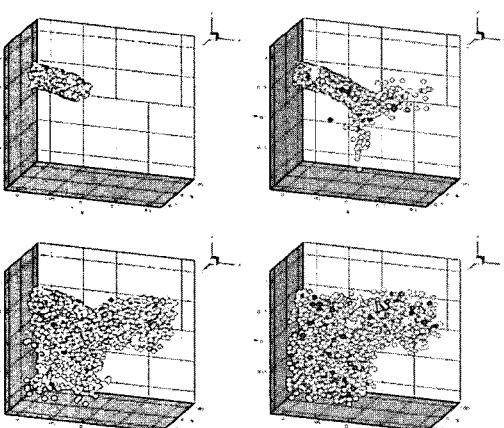


Fig. 2. 입자동역학을 이용한 유동 시뮬레이션.

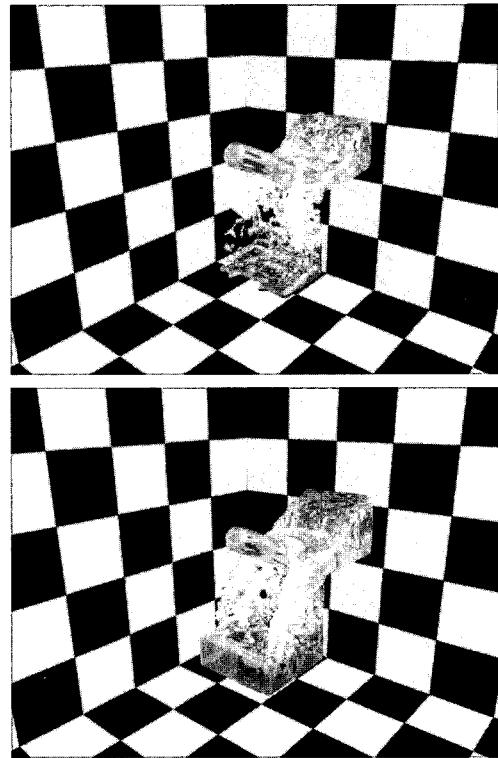


Fig. 3. 입자동역학 시뮬레이션 결과물의 렌더링.

보다 염밀한 유동해석을 위해서는 Navier-Stokes 방정식을 사용한 유체역학적 해석기법들이 사용된다. 유체 애니메이션에 있어 가장 중요한 요소는 유체의 경계면 형상을 효과적으로 표현하는 일이다. 일반적으로 유체의 경계면은 불규칙한 자유 표면으로 이루어진다. 다양한 자유표면의 추적기법 가운데, 고속의 실시간 렌더링에 적합한 볼륨 렌더링방식과 손쉽게 연동 가능한 기법으로는 VOF 방법이 있다. 유동방정식의 해석 결과를 분석하여 경계면을 추적하면 Fig. 4와 같은 불규칙한 유체의 자유표면 형상을 구해낼 수 있다.

이와 같이 하여 시뮬레이션으로 구해진 자유표면의 형상을 렌더링하면 Fig. 5와 같은 이미지가 얻어진다.

3. 하드웨어 가속 선적분 볼륨 렌더링

볼륨 렌더링은 3차원의 공간에 분포된 물질의 단위부피당 체적분율에 해당하는 밀도값을 균등한 간격의 단면으로 샘플링하여 입체적으로 가시화하는 기술이다⁽⁸⁾. 이 방법은 반투명한 볼륨의 2차원 투영을 계산

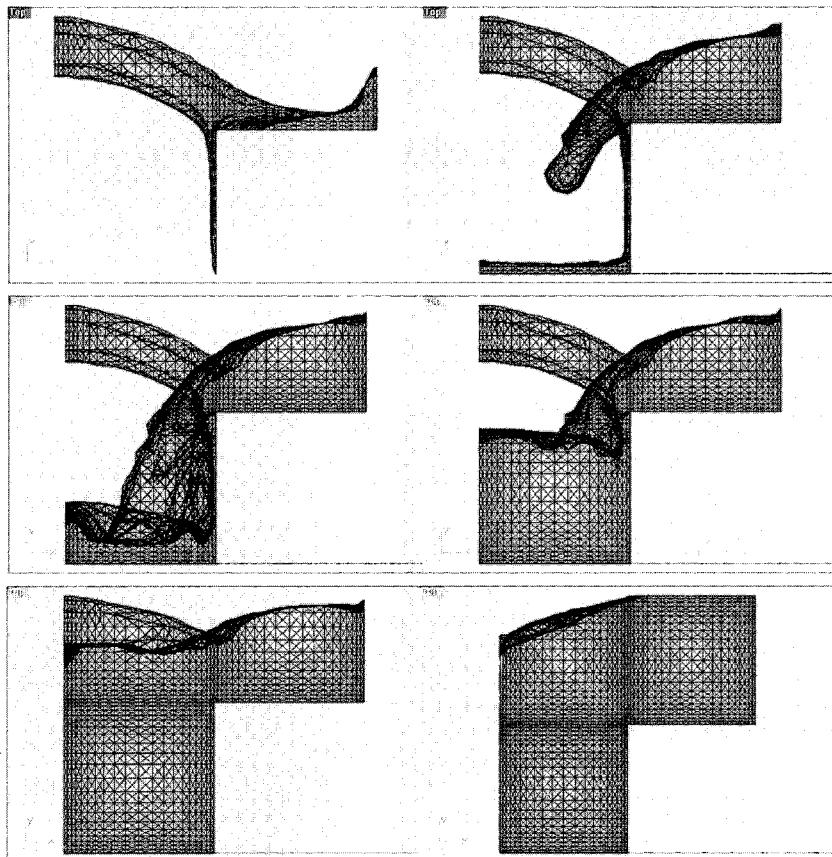


Fig. 4. Navier-Stokes 방정식을 이용한 유동 시뮬레이션

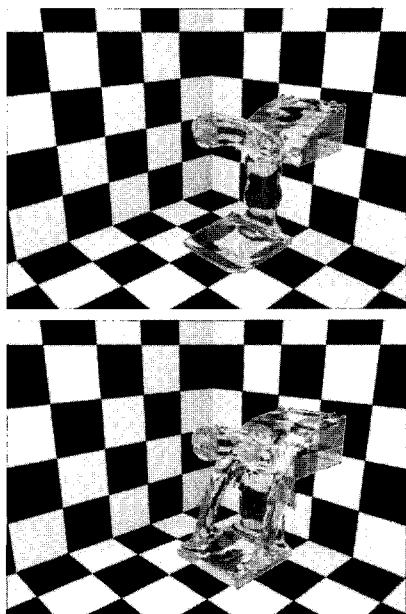


Fig. 5. Navier-Stokes 방정식으로 해석된 결과물의 렌더링.

하여 이미지를 얻는다. 이때 전체 볼륨 내의 각 복셀 (Voxel)은 실제 데이터로부터 얻어진 색상과 불투명도를 갖는다. 볼륨 렌더링의 한 방법인 광선 투영법은 시점에서 출발하는 광선을 따라서 볼륨 데이터를 샘플링하고, 샘플링한 점들의 색상과 불투명도를 적분하여 픽셀에 투영한다. 선적분 볼륨 렌더링이란 볼륨 데이터의 인접한 두 슬라이스 사이의 색상과 불투명도를 미리 적분하여 2차원 텍스쳐에 저장해 두고 렌더링 시에 이를 이용하여 음영화(shading)하는 볼륨 렌더링의 한 방법이다⁽⁷⁾. 슬라이스의 값만으로 합성(compositing)하는 기존의 방법⁽¹⁰⁾보다 슬라이스 사이의 색상과 불투명도를 적분하여 합성하므로 적은 개수의 슬라이스로도 우수한 화질을 얻을 수 있다. 또한, 전처리 단계로 색상과 불투명도를 미리 적분해 놓기 때문에 빠른 시간에 렌더링이 가능하다.

다양한 유체의 색상을 표현하기 위해서 Fig. 7의 불투명도 변환 함수를 사용한다. 볼륨 데이터는 입자의 체적분율 값을 사용하며, 0과 1사이의 실수 값을 갖

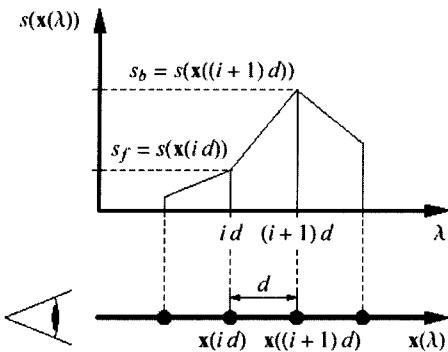


Fig. 6. 광선 경로상의 위치와 밀도 값의 관계.

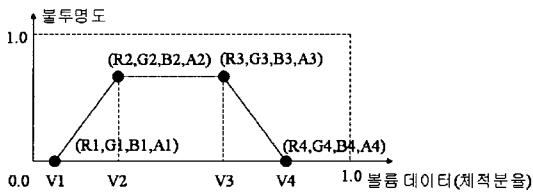


Fig. 7. Opacity Transfer Function.

는다. 해당 볼륨데이터를 나타내는 V_1, V_2, V_3, V_4 의 점에 유체의 다양한 시각적 효과를 표현하기 위한 색상을 지정한다. 각 점의 사이 값들은 선형 보간법을 이용하여 계산된다.

최근에는 그래픽스 하드웨어상에 하드웨어 텍스쳐 렌더링 기능이 탑재되어 이러한 렌더링 작업의 상당 부분을 고속의 그래픽스 하드웨어가 담당함으로써 보다 빠른 렌더링이 가능해졌다⁽¹⁴⁾. 시뮬레이션을 통해 얻어진 유체의 영상은 Fig. 8과 같이 컴퓨터그래픽으로 제작된 주위배경이나 실사사진 등과 실시간으로 합성되어 다양한 형태로 가공될 수 있다.

4. 응용 사례

실시간 유체 시뮬레이션 기술은 사용자의 동작과 연동되어 유체의 운동이 자유자재로 변화할 수 있으므로 컴퓨터게임, 설치미술, 공연예술의 배경화면 등 다양한 멀티미디어 환경에 사용될 수 있으며, 실시간 애니메이션 제작에도 활용될 수 있다. Fig. 9~Fig. 14는 2003년 일본 큐우슈우 공과대학에서 개최된 ADADA 국제학술대회, 2003년 서울 인사동 덕원갤러리 전시회, 2004년 예술의 전당 무대공연 작품 등에 사용된 실시간 유체 시뮬레이션의 응용사례이다.

Fig. 9는 잔잔한 물 표면에 발생하는 수면파의 움

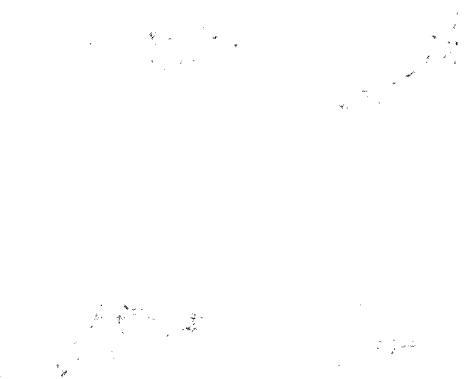


Fig. 8. 실시간 시뮬레이션 및 실사합성.⁽¹⁷⁾

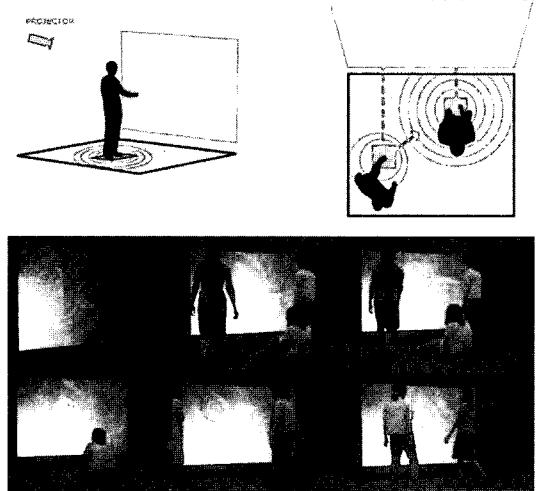


Fig. 9. 수면 파장의 실시간 시뮬레이션.

직임과 물표면 및 내부의 반사와 굴절의 효과를 caustics 기법을 적용하여 표현한 예이다. 관람자가 일정한 구역에 들어오면 바닥에 설치된 센서가 관람자의 움직임을 인식한다. 관람자의 위치에 해당하는 스크린상의 위치에 마치 물방울이 떨어져 동심원이 생기듯이 물결이 발생한다. 서있는 시간이 경과함에 따라

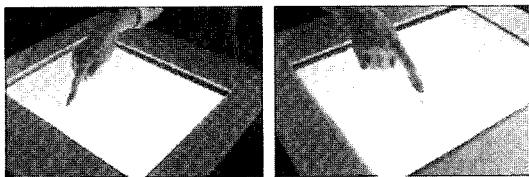


Fig. 10. 터치스크린 화면상에 구현된 물방울 놀이

라 파장이 점점 더 커지며 다른 관람자가 다가오면 두 파장이 서로 간섭한다.

Fig. 10의 예에서는 터치스크린 방식의 화면상에 특정한 위치를 손가락으로 자극하면 화면상의 해당 위치에서 물이 흘러나와 화면상에 떠다니면서 물방울들이 서로 부딪히고 결합하여 다양한 형상을 만들어 내는 효과이다. 물방울들은 관객의 손이 닿는 곳에서 다양한 형태로 흘러나와 화면을 채우게 된다.

Fig. 11의 예에서는 관람자의 손이 닿는 위치를 센서로 감지하여 유체가 흘러나오는 출구의 위치가 달라지도록 고안되었다. 관람자의 그림자 경계면을 이미지 프로세싱하여 유체가 그 경계면에 충돌하도록 프로그래밍 되어 있으며, 서로 다른 성질의 유체가 관람자의 그림자 내부에서 뒤섞인다.

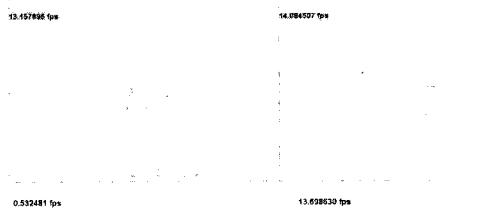


Fig. 11. 그림자와 종합된 유체 이미지.

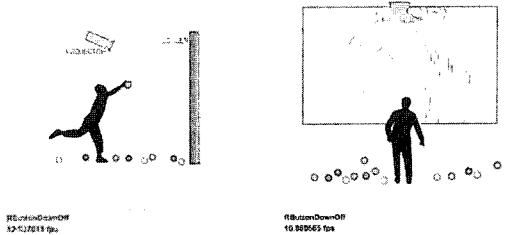


Fig. 11. 터치스크린 화면상에 구현된 물방울 놀이



Fig. 12. 유체 공 던지기 시뮬레이션.

Fig. 12의 예에서는 관람자가 선택한 공이 화면에 부딪혀 그 위치에서 유체 덩어리가 터져 흘러내리는 모습이 시뮬레이션 된다. 관람자가 바닥에 놓여진 여러 색상의 공 가운데 원하는 것을 선택하여 화면으로 던지면, 공에 닿은 스크린의 부분이 특정한 색상으로 퍼지거나 흘러내린다. 공이 던져지는 횟수와 던져지는 방향 및 시간의 차이에 따라 화면에 나타나는 이미지가 변화한다.

Fig. 13에서는 화면 앞에 놓인 센서에 입김을 불어 넣으면 입김의 세기에 따라 화면상에 나타나는 불꽃

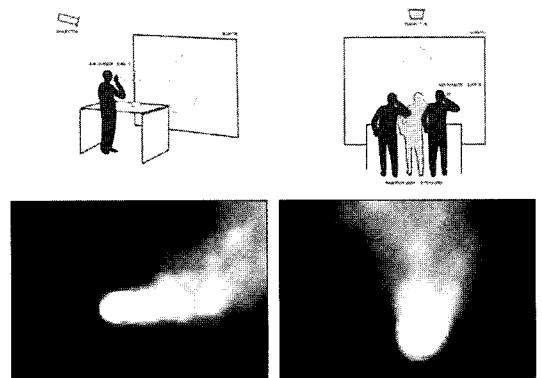


Fig. 13. 화염 및 연기 시뮬레이션



Fig. 14. 무용공연의 배경화면으로 사용된 실시간 유체 시뮬레이션.

의 크기가 변화한다. 두 사람 혹은 세 사람의 관객이 동시에 입김을 불 때는 각 센서에 감지된 바람에 따라 다른 방향으로 불꽃이 움직인다.

Fig. 14는 2004년 7월 예술의 전당에서 공연된 무용공연의 배경화면으로 사용된 실시간 유체 시뮬레이션의 예이다. 무용수들의 움직임을 센서로 감지하여 움직임이 클수록 유체의 운동이 더 활발하도록 설정되어 공연의 내용과 일체감 있게 변화하는 배경을 구현하였다.

5. 결 론

전산유체 해석기법을 이용한 유동 해석은 방대한 연산 양으로 말미암아 오랜 연산시간이 소요되어 실시간 유체 애니메이션에 적용되는 사례가 극히 제한적이었다. 최근에는 이러한 해석기법들을 일부 수정하여 해의 엄밀성을 다소 희생하는 대신 알고리즘의 안정성을 획기적으로 개선한 새로운 기법들이 개발되고 있으며, 이와 더불어 보다 신속한 연산이 가능한 입자동역학 기법을 혼용함으로써 실시간 유체 시뮬레이션이 가능해졌다. 또한 선적분 볼륨렌더링 기법과 하드웨어 가속기술의 발전으로 높은 품질의 유체 이미지를 신속하게 산출하는 일이 가능해졌다. 이러한 고속의 유체 시뮬레이션 기법과 고속의 렌더링 기법을 조합하여 유체 애니메이션을 실시간에 구현할 수 있게 되었으며, 사용자의 동작을 입력 받아 즉시 변화하는 인터랙티브 시뮬레이션이 가능하게 되었다. 이러한 실시간 유체 애니메이션 기술은 컴퓨터게임, 공연 배경동영상, 설치미술, 가상현실 등의 다양한 멀티

미디어 환경에 효과적으로 적용될 수 있다.

참고문헌

- 1) Nick Foster, "Realistic Animation of Liquids," Proceedings of Graphical Models and Image Processing, pp. 204-212, 1996.
- 2) Jos Stam, "Stable Fluids," Proceedings of ACM SIGGRAPH '99, pp. 121-128, 1999.
- 3) Nick Foster, Ronald Fedkiw, "Practical animation of liquids," Proceedings of ACM SIGGRAPH '01, pp. 23-30, 2001.
- 4) D. Enright, "Animation and Rendering of Complex Water Surfaces," Proceedings of ACM SIGGRAPH '02, pp. 734-744, 2002.
- 5) Henrik Wann Jensen and Per H. Christensen, "Efficient Simulation of Light Transport in Scenes with Participating Media using Photon Maps," Proceedings of SIGGRAPH '98, pp. 311-320, July 1998.
- 6) D. C. Rapaport, *The art of molecular dynamics simulation*, Cambridge University Press, 1995.
- 7) Klaus Engel, Martin Kraus, and Thomas Ertl, "High-Quality Pre-Integrated Volume Rendering Using Hardware-Accelerated Pixel Shading," ACM Siggraph/Eurographics Workshop on Graphics Hardware 2001, pp. 9-16, 2001.
- 8) Miller, Gavin S. P., Pearce,A., Globular Dynamics: A Connected Particle System for Animating Viscous Fluids, Computers and Graphics, Vol. 13, No. 3, pp. 305-309, 1989.
- 9) Terzopoulos, Platt, Fleischer, From Goop to Glop: Melting Deformable Models, Graphics Interface, 1989.
- 10) Marc Levoy, "Efficient Ray Tracing of Volume Data," ACM Transactions on Graphics, Vol. 9, No. 3, pp. 245-261, July, 1990.
- 11) Yagel, R. and Shi, Z., "Accelerating volume animation by space-leaping," Proceedings of IEEE Visualization '93, pp.62-69, 1993.
- 12) Sramek, M. and Kaufman, A., "Fast ray-tracing of rectilinear volume data using distance transforms," IEEE Transactions on visualization and computer graphics, Vol.6, No.3, pp. 236-252, 2000.
- 13) Danskin, J. and Hanrahan, P., "Fast algorithms for volume ray tracing," Workshop on Volume Visualization, pp. 91-98, 1992.

- 14) S. Rottger, M. Kraus, and T. Ertl, "Hardware-accelerated volume and isosurface rendering," In Proc. Of Visualization '00, pp. 109-116, 2000.
- 15) McQuarrie, D.A., Statistical Mechanics, Harper and Row, New York, pp. 21-32, 1976.
- 16) Maitland, G.C., Rigby, M., Smith, E. B., and Wakeham, W. A., Intermolecular Forces, Clarendon Press, Oxford, pp. 125-130, 1981.
- 17) Moon Koo Kang and, Jeongjin Lee, "A Real-time Simulation and Rendering of Fluids Using Particle Dynamics and Volume Rendering," to be published in Computer Animation and Virtual Worlds
- 18) Moon Koo Kang and, Jeongjin Lee, "A Hybrid Simulation Technique Using Particle Dynamics and Continuum-based Fluid Mechanics for Real-time Flow Animation," submitted for publication in Computer Animation and Virtual Worlds