

# 포톤 매핑 기법을 이용한 폭발 및 화염의 사실적인 렌더링 기법\*

강병권 임인성

서강대학교 컴퓨터학과

wormkbk@grmanet.sogang.ac.kr, ihm@sogang.ac.kr

## Realistic Rendering of Explosion and Flame Using Photon-Mapping

Byungkwon Kang Insung Ihm

Department of Computer Science, Sogang University

### 요 약

최근 활발하게 진행되고 있는 물리 기반 유체 애니메이션에 관한 연구 결과 다양한 형태의 유체 시뮬레이션 데이터가 빈번히 생성되고 있다. 이러한 데이터를 사용하여 고급 애니메이션을 제작하기 위해서는 사실적인 유체 렌더링 기법의 적용이 필수적이다. 본 논문에서는 자연 현상 중에서 컴퓨터 애니메이션 제작에 있어 매우 유용하게 사용할 수 있는 폭발이나 화염과 같은 부류의 유체에 대하여 렌더링의 사실성을 향상 시킬 수 있는 기법을 제안한다. 본 기법은 물리 기반 시뮬레이션을 통하여 산출되는 유체의 여러 물리적 성질에 대하여 포톤 매핑 기법을 적용함으로써, 연기 데이터에 대하여 유체 광원이나 선팅 등과 같은 특수 효과를 구현하는 데에 유용하게 사용될 수 있다.

### 1. 서론

컴퓨터 애니메이션 분야에서 다양한 자연 현상에 대한 사실적인 표현은 매우 중요한 문제이다. 최근 여러 컴퓨터 애니메이션 제작에 있어 물, 화염, 연기와 같은 유체 애니메이션의 연구 결과가 성공적으로 적용되어 왔으며, 이러한 노력은 애니메이션의 사실성을 높이는 데에 있어 크게 기여하고 있다.

특히 최근 수년간 다양한 형태의 유체에 대하여 물리 기반 시뮬레이션 기법에 관한 연구가 활발히 진행되어

왔다. Foster와 Fedkiw 등은 [1,2,3] 등의 연구를 통해 유체 역학에서 사용되는 대표적 이론인 Navier-Stokes 방정식을 컴퓨터 애니메이션 분야에서의 적용에 적합한 형태로 풀어내어 물과 같은 유체의 흐름을 계산할 수 있는 효과적인 방법을 제안하였다. Stam은 기존의 시뮬레이션 방법들의 계산 과정에서 야기되는 불안정성을 해결하기 위하여 Semi-Lagrangian 기법을 이용하여 연기에 대한 시뮬레이션 기법을 제안하였다[4]. Fedkiw과 Triulle 등은 이러한 시뮬레이션 기법을 연기의 시뮬레이션에 적용하고 그 흐름을 제어할 수 있는 기법을 제안하였다[5,6]. 또한 여러 연구자들이 물리 기반 유체 애니메이션 기법을 적용하여 불꽃과 폭발, 화염과 같은 다양한 자연 현상을 사실적으로 표현할 수 있는 방법을 제안하였다[7,8,9,10].

일반적으로 폭발이나 화염과 같이 높은 온도를 수반하

---

\* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2002-000-00512-0)의 지원을 받았음.

는 현상은 그 열에 의해 빛을 방출하게 된다. 이 때, 물질의 온도에 따라 빛이 갖는 파장과 색깔 등의 다양한 특성이 결정되며 이 물질은 주변을 비추는 광원이 될 수 있다. 이러한 폭발, 화염과 같은 자연 현상의 경우 실제 생활에서 흔히 볼 수 있는 현상들이고, 컴퓨터 애니메이션에 유용하게 사용될 수 있기 때문에, 물리적으로 이러한 유체의 흐름을 계산하기위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 더불어, 기존의 다양한 연구에서 기체의 사실적인 렌더링을 위한 기법들이 연구되어 왔지만, 이러한 유체가 장면 안에서 하나의 광원이 되는 경우에 대한 사실적인 렌더링에 관한 연구는 아직까지 미흡한 것이 사실이다.

본 논문에서는 기존의 기체 렌더링 기법과 포톤 매핑(photon-mapping) 기법을 응용하여 높은 온도를 갖는 기체의 사실적이고 직관적인 렌더링 기법을 제안하고자 한다. [3,5] 등의 연구에서 물과 연기의 사실적 렌더링에 있어 포톤 매핑 기법의 사용을 제안하였는데, 단순히 기존의 기법을 적용한 수준이었다. 특히, 밀도장이나 유체의 표면 데이터 외에 물리 기반 시뮬레이션의 부산물로 생성되는 속도, 온도, 압력, 화학 반응시의 반응 속도 등 유체의 물리/화학적 성질을 렌더링 기법에 적용하지 못해 왔다. 본 논문에서 제안하는 기법은 유체의 이러한 물리/화학적 성질을 통하여 기존의 포토 매핑 기법을 확장함으로써, 폭발하는 유체의 광원 효과나 섬광 효과와 같은 다양한 특수 효과를 제작할 수 있도록 고안되었다.

## 2. 연기, 가스 등의 Participating Media의 렌더링을 위한 기존의 포톤 매핑 기법

사실적인 렌더링을 위해 사용되는 기법으로는 광선 추적법이 대표적이지만, 이 기법은 간접 조명을 제한적으로밖에 표현할 수 없다는 제약이 있기 때문에 그 단점을 극복하기 위하여 다양한 방법들이 개발되어 왔다. 특히, 좀 더 사실적인 광원 효과를 위하여 간접 조명을 표현하기 위한 여러 방법들이 제시되어 왔는데, 포톤 매핑 기법도 그 중의 하나라 할 수 있다. 포톤 매핑 기법은 그 구현이 간단하고, 단순한 Monte-Carlo 광선 추적법에서와 같이 과도한 노이즈를 생

성하지 않기 때문에, 사실적인 렌더링을 위해 유용하게 사용되는 기법이다[11,12]. 이 기법은 광원에서 광도를 가진 많은 수의 입자 즉, 포톤(photon)을 방출하고 그 포톤이 지나가는 경로를 추적하여 그 곳에 광도를 높여주는 기법이다.

포톤 매핑 기법은 크게 두 단계로 이루어진다. 첫 번째 단계는 광원에서 방출된 포톤들의 경로를 추적하는 단계이다. 각 포톤들은 광원의 광도와 색깔에 따라 적절한 정보를 가지고 전경 안으로 뿌려지게 되며, 광선 추적법과 같은 방법을 이용하여 전경에서의 경로를 추적하게 된다. 전경의 물체와 만난 포톤은 그 지점에서 흡수되거나 반사되게 되는데, 이렇게 한 물체와 만나 반응하게 된 포톤은 그 지점에서 저장되어 빛이 비춰진 곳을 나타내게 된다. 이렇게 포톤의 위치가 저장된 정보를 포톤 맵(photon map)이라 한다.

두 번째 단계는 이렇게 구성된 포톤 맵을 이용하여 전경을 렌더링 하는 단계이다. 기본적인 렌더링 기법은 광선 추적법이며, 각 지점에서 셰이딩 계산이 이루어질 때 포톤 맵에서 그 지점에서의 포톤에 의한 조명을 계산하여 셰이딩 계산에 그 광도를 적용하게 된다. 이 과정에서 효율적인 계산을 위하여 직접 조명효과는 기존의 광선 추적법의 셰이딩 기법을 이용하여 계산하고, 포톤 맵에서의 광도는 간접 조명을 표현하는 데에만 사용되게 된다.

포톤 매핑 기법은 안개와 구름과 같은 유체의 렌더링에도 효과적으로 사용될 수 있다[13]. 일반적으로 안개나 구름과 같이 밀도장의 형태로 표현되는 물체는 ray-marching과 같은 방법으로 렌더링 되지만, 밀도장 내부에서 일어나는 빛의 산란 효과는 표현되기 어렵다. 포톤 매핑 기법을 이용하면 이러한 빛의 산란 효과에 의한 밀도장 내부에서의 간접 조명효과를 표현할 수 있으며, 이로 인해 최근에는 연기와 구름과 같은 유체의 렌더링에 유용하게 사용되고 있다. 이러한 밀도장 내부에서 저장되는 포톤 맵은 일반적인 포톤 맵과 다르게 구성되는데, 본 논문에서는 그 구분을 위하여 일반적인 포톤 맵을 전역 포톤 맵(global photon map)이라 하고, 밀도장 내부에서 구성되는 포톤 맵을 볼륨 포톤 맵(volume photon map)으로 표현하도록 하겠다.

### 2.1 전역 포톤 맵 (Global Photon Map)

포톤이 일반적인 물체와 만나서 그 표면에 저장될 때 그

포톤은 전역 포톤 맵에 저장 된다. 광원에서 방출된 모든 포톤들의 경로가 계산되어 전역 포톤 맵의 구성이 끝나면 광선 추적법을 이용하여 렌더링을 수행한다. 렌더링 단계에서 한 지점에서의 간접 조명은 그 지점에서의 포톤의 밀도에 의해 계산되는데, 웨이딩이 일어나는 지점에서 가장 가까운  $N$ 개의 포톤을 전역 포톤 맵 안에서 찾아내어 식 (1)과 같이 그 광도를 계산하여 이를 간접 조명에 의한 광도로 계산한다.

$$L(x, \vec{\omega}) \approx -\frac{1}{\pi^2} \sum_{p=1}^N f(x, \vec{\omega}_p, \vec{\omega}) \Delta \Phi_p(x, \vec{\omega}) \quad (1)$$

많은 수의 포톤들이 저장되어있는 포톤 맵 안에서  $N$ 개의 포톤을 찾기 위해  $k$ -d트리와 같은 자료구조를 사용하게 된다.

## 2.2 볼륨 포톤 맵 (Volume Photon Map)

포톤 매핑 기법은 연기나 가스와 같이 밀도장의 형태로 표현되는 유체의 내부에서 발생하는 빛의 산란 효과를 표현하는 데에 유용하게 사용된다. Ray-marching 기법을 이용하여 렌더링을 수행할 경우 빛의 직접 산란은 계산이 가능하지만, 다중 산란 효과까지는 표현이 불가능하다. 포톤 매핑 기법을 이용하여 이러한 다중 산란 효과가 표현 가능해지는데, 하나의 포톤이 밀도장 내부로 진행해 들어오게 되면, 각 지점에서의 밀도 값과 기타 여러 정보들로부터 그 지점에서 포톤과 물질이 반응하게 되는지를 결정하게 된다. 만일 그 지점에서 포톤이 물질과 반응하게 되면, 볼륨 포톤 맵에 그 포톤을 저장하고 산란을 통해 그 포톤이 진행해 나갈 방향을 결정하여 계속 진행하도록 한다. 산란된 포톤은 다시 밀도장 내부로 진행하면서 특정 간격마다 그 물질과 반응하여 산란 혹은 흡수된다. 이렇게 하나의 포톤이 밀도장 내부에서 계속해서 산란되어 진행함에 따라 빛의 다중 산란효과를 나타낼 수 있게 된다. 이렇게 밀도장 내부로 진입한 포톤들의 경로를 추적하고 볼륨 포톤 맵을 구성하면, 밀도장 내부에서의 빛의 산란 효과를 표현할 수 있게 되는데, 각 웨이딩 지점에서의 산란된 빛의 광도를 계산하기 위하여 다음과 같은 식을 통해 그 지점에서의 포톤에 의한 광도를 계산하게 된다.

$$(\vec{\omega} \cdot \nabla)L(x, \vec{\omega}) \approx \sum_{p=1}^N f(x, \vec{\omega}_p, \vec{\omega}) \frac{\Delta \Phi_p(x, \vec{\omega})}{\frac{4}{3} \pi r^3} \quad (2)$$

## 3. 사실적인 빛의 방사를 위한 포톤 매핑 기법의 확장

일반적인 광선 추적법과 포톤 매핑 기법으로는 높은 온도를 갖는 물질이 빛을 낼 때의 광원 효과를 표현하기가 어렵다. 포톤 매핑 기법은 전경에 설정된 각 광원마다 사용자가 지정한 개수의 포톤이 방출되어 그 포톤의 경로를 추적하여 조명이 비춰지는 지역을 계산하는 기법이다. 이 방법에서 사용자는 광원에서 방출되는 각 포톤의 방향을 설정하여 빛이 비춰지는 형태를 조절할 수 있다. 하지만, 불꽃이나 화염, 폭발과 같이 높은 온도를 갖고, 연속적으로 변화하는 광원은 기존의 방법으로는 구현하기가 어렵다. 따라서 물리 기반의 시뮬레이션 기법을 통해 얻어진 유체 데이터의 다양한 정보를 광원 효과에 적용하기가 어려운 점이 있다. 본 논문에서는 기존의 연구를 통해 구현된 물리 기반의 유체 시뮬레이션 기법에서 얻어진 다양한 유체의 정보에서 이 유체를 광원으로 적용하였을 때, 그 조명 효과를 직관적으로 조절할 수 있는 렌더링 기법을 구현하기 위하여 포톤 매핑 기법을 응용한 새로운 렌더링 기법을 제안하였다. 이 기법에서는 기존의 포톤 매핑 기법에 방사 포톤 맵과 섬광 포톤 맵이라는 새로운 포톤 맵을 추가하여 다양한 광원 효과를 표현할 수 있도록 하였다.

### 3.1 방사 포톤 맵 (Emission Photon Map)

물리 기반 유체 시뮬레이션 기법에서는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 유체의 온도장의 흐름을 계산할 수 있다. 또한 Ihm 등에 의해 제안된 방법을 통해 연체 반응을 이용한 폭발과 같은 효과의 경우 매우 급격히 변화하는 온도장과 속도장의 흐름을 얻어낼 수 있다 [14]. 일반적으로 연기와 같은 유체 안의 한 지점에서 광자는 확률적으로 무작위 방향으로 방출되지만 [15,16], 본 논문에서는 애니메이션의 효과적인 제어를 위해 다음과 같은 식을 통해 포톤이 방출되는 중심 방향을 결정하도록 하였다.

$$\vec{P} = -\nabla T \quad (3)$$

즉, 온도가 높은 지역에서 낮은 지역으로 포톤의 방향이 생성이 되는데, 이런 방법으로 높은 온도의 물체가 주변으로 빛을 방출하는 형태가 구성된다. 이렇게 각 지점에서의 온도장에 대해서 빛이 방출되는 방향을 결정하면 사용자에게 의해 정의된 범위 안에서  $\vec{P}$ 를 중심으로 입체각(solid angle)을 계산하여 식 (4)에서 계산된 개수만큼의 포톤을 방출하게 된다.

$$N_{\text{photon}} = \frac{T - T_{\text{amb}}}{(\text{temperature per photon})} \times \text{density} \quad (4)$$

이렇게 방출되는 포톤들은 [13]에서 제안된 방식으로 볼륨 포톤 맵 형태로 저장되는데, 본 논문에서는 기존의 볼륨 포톤 맵과 구별을 하기 위하여 이러한 포톤들을 방사 포톤 맵(Emission photon map)이라는 추가적인 맵에 저장하였다(〈그림 1〉 참조).

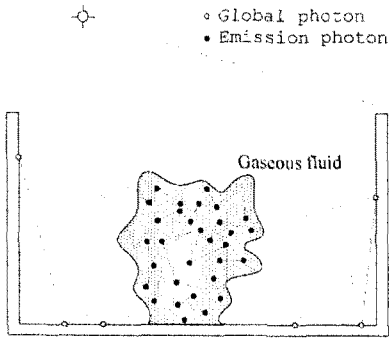


그림 3. 방사 포톤맵의 구성.

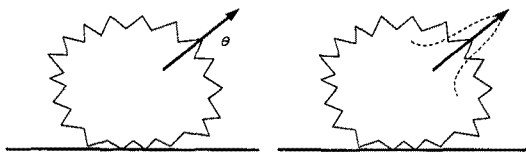


그림 4. 밀도장에서 포톤이 방출되는 방향

포톤은 입체각의 범위 안에서 균일하게 방출될 수도 있지만, importance sampling을 통해서 더 나은 결과를

얻을 수 있다(〈그림 2〉 참조). 각 포톤들은 물리 기반 유체 애니메이션기법을 통해 계산된 여러 정보들에 따라 적절한 광도와 색을 가지고 방출되게 된다. 이러한 포톤들은 그 지점에서 방출됨과 동시에 기존의 밀도장에 대한 포톤 매핑 기법과 유사하게 그 경로가 계산되어 밀도장 내부에 저장되게 된다. 만일, 한 포톤이 밀도장 내부에서 흡수되지 않고 외부로 방출되는 경우, 이 포톤은 일반적인 전역 포톤으로 바뀌어 전역 포톤의 경로 추적 방식대로 그 경로가 계산된다. 이는 방출된 빛이 주변 물체를 비추는 효과를 낼 수 있다.

### 3.2 섬광 포톤 맵 (Flash Photon Map)

물리적인 폭발의 시뮬레이션을 사실적으로 가시화하기 위해서는 폭발하는 물질의 형태를 사실적인 렌더링으로 나타내어야 함과 동시에 폭발파(blast-wave) 등과 같이 폭발에 수반되는 현상들을 표현할 수 있어야 한다[17]. 하지만, 시각적으로 보다 현실적으로 보이도록 하기 위해서는 폭발에 의해 발생하는 밝은 빛 즉, 섬광과 같은 효과(flash-like effect)의 표현이 필요하다. 본 논문에서는 앞서 설명한 새로운 렌더링 기법을 확장하여 이러한 섬광의 표현을 사실적으로 표현할 수 있는 렌더링 기법을 구현하였다.

우선, [9,10,16]등에서 제안된 것과 같이 폭발하는 물질의 시뮬레이션을 수행하게 되면, 이 유체의 속도와 온도, 반응 속도 등의 다양한 정보를 얻을 수 있다. 빠른 속도로 화학 반응을 일으켜 폭발 현상을 일으키는 유체의 경우 밝은 섬광을 나타내기 위해서 온도장이나 반응 속도와 같은 정보를 이용할 수 있다. 이러한 폭발하는 유체의 경우, 그 온도장은 매우 높고 급격하게 변화하며 사용자는 섬광을 만들게 되는 온도의 범위를 직관적으로 조절하여 짧은 순간에 매우 밝은 빛을 내는 섬광의 표현을 얻을 수 있다.

본 논문에서 제안한 기법은 이러한 섬광 효과를 새로운 포톤 맵을 추가하여 표현할 수 있는 기법이다(〈그림 4〉 참조). 새롭게 추가된 포톤 맵을 섬광 포톤 맵(flash photon map)이라 하고, 이 포톤 맵에 사용되는 포톤들은 식 (3)에서와 같이 그 방출 방향의 중심이 계산된다. 온도장에 의해 방출되는 볼륨 포톤의 경우, 방출된 포톤

은 밀도장에 반응하여 산란되기도 하고, 밀도장 내부에 흡수되기도 하지만, 섬광 포톤은 그 지점의 온도에 따라 퍼지는 거리를 다음과 같이 계산하여 그 거리만큼을 포톤 맵에 저장하게 된다.

$$P_{flash} = \rho_{range} \times f_{range}(T) \quad (5)$$

위 식에서  $P_{flash}$ 는 그 지점에서의 온도에 의해 섬광이 비춰질 거리이며,  $\rho_{range}$ 는 사용자에게 의해 조절되는 섬광의 최대 거리이다.  $f_{range}(T)$ 는 사용자가 정한 섬광이 방출될 온도의 범위 ( $T_{minF}$ ,  $T_{maxF}$ )와 그 지점에서의 온도에 따라 얼마나 멀리까지 섬광이 방출될지 결정하는 함수이다. 이 함수의 결과에 따라 섬광이 비춰질 거리가 결정된다. 이렇게 결정된  $P_{flash}$  값은 섬광 포톤이 얼마나 멀리까지 뿌려질 것인가를 결정하게 되며, 이 거리만큼 섬광을 표현하기 위한 포톤이 뿌려지게 되는데, 이 거리 안에서 포톤은 사용자가 정의한 간격을 따라 저장되어 그 지점의 광도를 나타내게 된다. 이 섬광 포톤들은 밀도장에 의해 굴절되거나 반사되지 않으며 정해진 거리까지 저장되어 빛이 퍼져나가는 형태를 표현한다. 이러한 섬광이 주변 물체에 의해 가려진다면, 섬광 포톤들은 물체와 만나는 지점까지 저장되고 그 지점에서 반사되어 일반적인 전역 포톤의 형태로 바뀌어 그 경로를 추적하도록 한다.

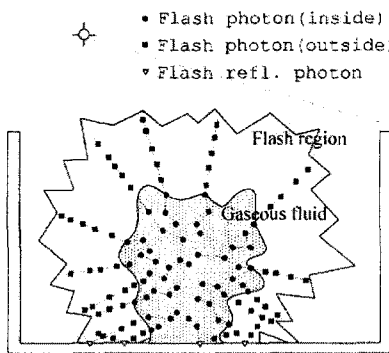


그림 5. 섬광 포톤맵의 구성.

### 3.3 포톤 광원의 렌더링

온도장에 의해 방출된 볼륨 포톤들은 방출된 후에 밀

도장과 반응하여 볼륨 포톤 맵에 함께 저장되고 이를 이용하여 광원의 색을 나타내게 된다. 이 볼륨 포톤 맵 안의 각 포톤들이 온도에 따른 색을 가지고 있기 때문에, 사용자가 정의한 스펙트럼에 따라 연기는 다른 색을 나타낼 수 있다. 또한, 밀도장을 뚫고 다른 물체에 도달한 포톤들은 전역 포톤맵안에 함께 저장되어 주변 물체들에 비춰진 빛을 표현한다. 이러한 효과는 기존의 포톤 맵 렌더링 기법과 같은 방법으로 렌더링할 수 있다.

높은 온도를 갖는 물체의 경우 그 섬광 효과를 나타내기 위하여 앞서 설명한 방법을 통해 섬광 포톤 맵을 구성하게 된다. 이 포톤 맵은 전역 포톤 맵, 볼륨 포톤 맵과는 다른 새로운 포톤 맵으로, 볼륨 포톤 맵과 같은 형태로 표현되지만, 렌더링 과정에서 다음과 같이 그 색과 불투명도가 계산된다.

$$a_i C_i = a_d C_d + a_{phot} C_{phot} \quad (6)$$

$$a_i = a_d + a_{phot}, \text{ where } a_{phot} = a_{max} \times \frac{N}{N_{max}} \quad (7)$$

위 식에서  $N$ 은 그 위치에서의 광도를 계산하기 위해 섬광 포톤 맵에서 찾아낸 포톤의 개수이며  $N_{max}$ 는 포톤을 찾을 때의 최대 개수가 된다.  $a_{max}$ 는 섬광 포톤 맵이 가지는 불투명도를 나타낸다. 그리고 섬광의 색  $C_{phot}$ 은 볼륨 포톤 맵과 마찬가지로 다음과 같이 계산된다.

$$C_{phot}(r, g, b) = \sum_{p=1}^N f(x, \vec{\omega}_p, \vec{\omega}) \frac{C_d(r, g, b)}{\frac{4}{3}\pi r^3} \quad (8)$$

이 과정은 기존의 방법과 비슷하게 forward ray-marching 기법을 통해 구현되는데, ray-marching이 수행되는 광선 벡터의 범위가 유체가 존재하는 밀도장 범위 안에서만 이루어지는 것이 아니라 섬광 포톤 맵의 범위 안에서 이루어져야 하기 때문에 계산량이 많다는 단점이 있다.

### 3.4 섬광 반사 포톤 맵 (Flash Reflection Photon Map)

빛은 공기속을 진행해 나가다가 여러 종류의 물체에 부딪히고, 이로 인해 다양한 시각적 현상을 일으킨다. 그 중 빛이 물이나 유리잔과 같이 굴절률을 갖는 물질을 통과할 때 그 표면의 형태로 인해 빛이 굴절되어 집중적으로 모이는 효과를 내는데, 이것을 caustic 효과라 한다.

이러한 caustics 효과를 이용하여 수영장 바닥이 반짝거린다거나 와인 잔에 빛이 굴절되어 렌즈와 같은 효과를 내는 것을 표현할 수 있다. Caustic 효과는 Monte-Carlo 광선 추적법에 의해 구현될 수 있지만, 일반적으로 노이즈가 발생할 수 있다는 단점이 있기 때문에, 포톤 맵핑 기법을 이용하여 표현하는 기법이 개발되었다[11,12].

본 논문에서는 폭발 현상에 의해 발생하는 섬광의 효과를 보다 사실적으로 표현하기 위하여 주변 물체에 비춰지는 섬광의 형태를 caustics 포톤 맵 기법을 응용하여 강조할 수 있도록 하였다. 일반적으로 폭발에 의한 섬광이 비춰질 때, 그 주변에 있는 물체들에 굉장히 밝은 빛을 비추게 되는데, 이렇게 섬광이 주변 물체에 비춰지는 형태도 장면의 사실성을 높이기 위하여 활용될 수 있는 한 가지 요소이다. 본 논문에서는 이러한 효과를 구현하기 위하여 섬광 반사 포톤 맵(flash reflection photon map)이라는 새로운 포톤 맵을 추가하여 좀 더 사실적인 섬광의 효과를 표현할 수 있도록 하였다(<그림 3> 참조).

우선 밀도장의 각 지점에서 방출된 섬광 포톤들이 다른 물체에 부딪히게 되는가를 검사한다. 만일 섬광 포톤이 다른 물체에 부딪힌다면 그 지점에서 섬광 반사포톤이 저장되고, 이 포톤은 반사되어 일반적인 전역포톤으로 그 경로를 추적하게 된다. 이렇게 각 지점에서 방출되는 섬광 포톤이 주변 물체들에 부딪히는 위치를 포톤 맵으로 저장하면 이 정보는 섬광이 직접 다른 물체에 비춰지는 지역의 정보가 된다. 이 섬광 반사 포톤 맵에서 [11]에서와 같이 식 (9)와 같은 가중치 함수를 적용하여 식 (10)과 같이 포톤의 광도를 계산하면, 섬광이 직접 비춰지는 지역은 주변보다 밝게 표현되어 보다 사실적인 효과를 구현할 수 있다.

$$w_p = \alpha \left( 1 - \frac{1 - e^{-\beta \frac{d^2}{2r^2}}}{1 - e^{-\beta}} \right) \quad (9)$$

$$L(x, \vec{\omega}) \approx \frac{1}{\pi r^2} \sum_{p=1}^N f(x, \vec{\omega}_p, \vec{\omega}) \Delta \Phi_p(x, \vec{\omega}_p) w_p \quad (10)$$

### 3.5 사용자에게 의해 제어되는 변수들

본 논문에서는 사실적인 유체의 렌더링을 위해서 스스로 빛을 발하는 유체의 렌더링 기법을 포톤 맵핑 기법을 응용하여 구현하였다. 이 기법에서는 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과물을 렌더링할 때 사용자가 직관적으로 결과를 제어할 수 있도록 몇 가지 제어 함수를 사용하였다.

우선 시뮬레이션 결과에서 얻을 수 있는 다양한 정보들을 사용할 수 있게 하였다. 가장 간단한 형태로 그 시점에서의 온도장에 대해서 방출될 포톤의 색깔과 개수, 방향을 설정할 수 있다. 이것은 온도장 대신 속도장 혹은 화학 반응이 수반될 때 그 반응 속도에 대해서도 응용될 수 있는데, 반응 속도에 따라 방출되는 포톤을 결정하는 방법을 적용하여 매우 많은 양의 화학 반응이 일어나는 때에만 밝은 섬광이 비춰지는 것과 같은 효과가 표현 가능하다.

두 번째로, 포톤의 밀도를 사용자에게 의해 조절할 수 있다. 섬광 포톤 맵의 경우 포톤들로 이루어진 하나의 볼륨 데이터의 형태로 구성된다. 이러한 데이터를 구성할 때 사용자에게 의해 정의된 다양한 변수들이 영향을 미치게 되는데, 가장 대표적인 것이 포톤의 밀도를 조절하기 위해 사용되는 변수들이다. 한 지점에서 포톤이 방출될 중심 벡터가 결정되면 사용자가 정한 개수만큼의 포톤들이 입체각 범위 안에서 방출되게 되는데, 온도장에 의해 방출되는 볼륨 포톤의 경우 식 (4)에 의해 방출되는 포톤의 양이 결정되고, 섬광 포톤의 경우 사용자에게 의해 정해진 개수만큼 방출되게 된다. 섬광 포톤의 경우 방출되는 포톤의 개수와 섬광 거리까지 저장될 때의 저장 간격이 포톤 맵의 밀도를 결정하게 된다. 최종적으로 섬광 포톤 맵의 불투명도까지 함께 적용되어 렌더링할 때의 섬광 포톤 맵의 불투명도가 결정된다.

또한, 각 지점에서 포톤들이 방출될 때 그 방향도 전체적인 이미지의 모양에 영향을 미치게 된다. 입체각의 중심각  $\theta$ 가 넓으면 전체적으로 부드럽게 퍼지는 광원의 형태가 되고, 반대로 좁으면 날카로운 빛이 퍼져나가는 형태가 눈에 띄도록 표현된다. 입체각 범위 안에서 importance sampling에 의해 중심방향 쪽으로 가중치를 두어서 보다 선명한 광원 효과를 얻을 수 있다.

사용자는 섬광 포톤이 방출되는 온도 혹은 반응 속도의 범위를 조절하여 섬광이 비춰지는 시간을 조절할 수

있다. 간단하게 사용자는  $(T_{minF}, T_{maxF})$ 의 값을 지정하여 섬광이 방출될 범위를 결정할 수 있지만, 각 지점의 온도에 따른 섬광의 방출 거리를 계산하는 식(5)에서  $f_{range}(T)$  함수를 정의하는 방법에 따라 여러 효과를 나

타내기 위하여 다양한 애니메이션 데이터에 새로운 기법을 적용해보았다. 본 실험에서 사용한 애니메이션 데이터는 모두 [14]에서 제안된 물리 기반 유체 애니메이션 기법을 통해서 시뮬레이션 된 데이터이며 대부분 높은

Frame	Surface Photons	Volume Photons	Flash Photons	Flash-Refl. Photons	p.tracing time (sec.)	rendering time (sec.)
3	48,113	23,220	19,593	12,122	50.7	141.1
4	1,914,608	2,112,280	606,007	495,571	1,317.5	830.7
6	654,730	553,213	181,252	28,710	441.1	346.6
16	535,118	471,538	5,948	2,559	581.1	552.1
20	545,121	449,038	7,389	680	375.4	407.2

표 1. <그림 9>에 대한 포톤의 개수 및 렌더링 시간

타낼 수 있다. 가장 간단하게  $(T_{minF}, T_{maxF})$ 의 범위에 대해서 식 (11)과 같이 선형적으로 섬광의 거리를 계산하는 방법을 사용할 수 있지만, 허릿 곡선과 같은 3차 곡선을 이용한 보간법으로 보다 자연스러운 결과를 만들어 낼 수 있다.

$$f_{range}(T) = \frac{T - T_{minF}}{T_{maxF} - T_{minF}} \quad (11)$$

마지막으로, 유체 시뮬레이션 엔진을 통해 구해진 온도장이나 반응 속도장의 경우 매 시간 프레임마다 그 변화가 급격하고 연속성이 강하지 못하다. 따라서 이러한 데이터에서 식(3)을 통해 포톤의 방향을 결정하게 되면, 연속적인 결과 이미지들에서 광원의 형태가 불규칙적으로 흐트러지게 되며 애니메이션으로 적용했을 때 자연스럽지 못하게 된다. 따라서, 이러한 불규칙하게 변화하는 온도장에 대하여 불규칙성을 완화해줄 수 있는 작업이 필요하다. 본 논문에서는 다음과 같은 확산(diffusion) 연산자를 적용하여 전체적인 포톤의 방향의 변화를 작게 하여 이러한 문제점을 해결하고자 하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nu_T \nabla^2 T \text{ or } \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} = \nu_P \nabla^2 \vec{P} \quad (12)$$

#### 4. 애니메이션 결과

본 논문에서 제안한 새로운 렌더링 기법의 효과를 나

온도장을 갖는 폭발과 유사한 형태의 시뮬레이션 결과들이다. 다양한 종류의 폭발 데이터에 대해서 방사 포톤 맵, 섬광 포톤 맵, 섬광 반사 포톤 맵을 각각 적용한 새로운 기법으로 렌더링을 수행하고, 이를 기존의 광선 추적법을 이용한 결과와 비교하였다. <그림 4.5>에서는 기존의 광선 추적법과 새로운 기법의 비교를 나타내었으며, <그림 6,7>에서는 방사, 섬광, 섬광 반사 포톤 맵을 각각 적용했을 때의 효과를 비교하고 있다. 마지막으로, <그림 8>은 복잡한 물체 내부에서의 광원 효과를 나타내기 위한 애니메이션 결과이다.

마지막으로, 이 기법은 [18]에서 물리 기반의 복사법칙을 통해 방출되는 포톤의 양을 조절할 수 있도록 확장되었다. <표 1>은 이 기법을 이용하여 <그림 9>과 같은 장면을 렌더링했을 때의 실험 결과이며, 이 실험은 펜티엄4 2.8G CPU와 1GB의 메모리를 갖는 PC환경에서 수행되었다.

#### 5. 결론 및 향후 연구

연기, 폭발, 화염등은 자연에서 흔히 볼 수 있는 현상이며 컴퓨터 애니메이션에서도 유용하게 사용될 수 있다. 본 논문에서는 폭발, 화염 등과 같이 높은 온도를 갖는 유체가 광원의 역할을 할 때, 사실적인 렌더링을 수행할 수 있는 새로운 렌더링 기법을 제안하였다. 이 기법은 방사 포톤맵과 섬광 포톤맵이라는 새로운 포톤맵을

제안하여 기존의 포톤 매핑 기법을 확장한 새로운 렌더링 기법이며, 이를 이용하여 폭발, 화염과 같은 뜨거운 기체의 사실적인 렌더링을 효과적으로 구현할 수 있었다. 또한, 물리 기반 유체 애니메이션 기법을 통해 얻어지는 여러 정보들에 적용될 수 있으며 사용자의 직관적인 제어를 가능하게 하는 여러 제어 함수들을 적용하여 사용할 수 있도록 하였다.

본 논문에서 제안한 기법을 다양한 애니메이션에 적용하여 실험을 수행하였고, 그 결과 이 기법을 이용하여 상당히 사실적인 이미지를 만들어 낼 수 있음을 알 수 있었다. 하지만, 추가적인 포톤 맵을 사용하여 렌더링함으로써 메모리 사용량이 증가하고 포톤의 개수가 증가함에 따라 계산량이 많아지는 단점이 있었다.

본 논문에서 제안한 기법은 기존에 애니메이터의 수작업 없이는 표현할 수 없었던 광원 효과들을 표현 가능하게 하여 하여 보다 사실적인 애니메이션 제작에 유용하게 사용될 수 있으리라 생각된다. 마지막으로, 향후 지속적인 연구를 통해 다양한 과학적 데이터의 가시화 분야에도 적용할 계획이다.

## 6. 참고문헌

- [1] N. Foster, and D. Metaxas, "Realistic animation of liquids," *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 58, No. 5, pp. 471-483, 1996.
- [2] N. Foster, and R. Fedkiw, "Practical animation of liquids," In *Proc. of ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 23-30, 2001.
- [3] D. Enright, S. Marschner, and R. Fedkiw, "Animation and rendering of complex water surfaces," *ACM Transactions on Graphics(ACM SIGGRAPH 2002)*, Vol 21, No 3. pp. 736-744, 2002.
- [4] J. Stam, "Stable fluids," In *Proc. of ACM SIGGRAPH 1999*, pp. 121-128, 1999.
- [5] R. Fedkiw, J. Stam, and H. Jensen, "Visual simulation of smoke," In *Proc. of ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 23-30, 2001.
- [6] A. Truille, A. McNamara, Z. Popovic, and J. Stam, "Key frame control of smoke simulations", *ACM Transactions on Graphics(ACM SIGGRAPH 2003)*, Vol. 22, No. 3, pp. 716-723, 2003.
- [7] D. Nguyen, R. Fedkiw, and H. Jensen, "Physically based modeling and animation of fire," *ACM Transactions on Graphics(ACM SIGGRAPH 2002)*, Vol. 21, No.3, pp. 721-728, 2002.
- [8] G. Yngve, J. O'Brien, and J. Hodgins, "Animating explosions," In *Proc. of ACM SIGGRAPH 2000*, p p. 29-36, 2000.
- [9] B. Feldman, J. O'Brien, and O. Arikan, "Animating suspended particle explosions," *ACM Transactions on Graphics(ACM SIGGRAPH 2003)*, Vol. 22, No. 3, pp. 708-715, 2003.
- [10] N. Rasmussen, D. Nguyen, W. Geier, and R. Fedkiw, "Smoke simulation for large scale phenomena," In *Proc. of ACM SIGGRAPH 2003*, pp. 703-715, 2003.
- [11] H. Jensen, *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*, A K Peters, Ltd, 2001.
- [12] H. Jensen, "Global illumination using photon maps," In *Rendering Techniques '96*, pp. 21-30, 1996.
- [13] H. Jensen, and P. H. Christensen, "Efficient simulation of light transport in scenes with participating media using photon maps," In *Proc. of ACM SIGGRAPH 1998*, pp. 311-320, 1998.
- [14] I. Ihm, B. Kang, and D. Cha, "Animation of reactive gaseous fluids through chemical kinetics", In *Proc. of Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation 2004*, pp. 203-212, 2004.
- [15] Ya. B. Zel'dovich, and Yu. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*, Dover Publications, Inc., 2002.
- [16] J. Mahan, *Radiation Heat Transfer: A Statistical Approach*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [17] M. Neff, and E. Fiume, "A visual model for blast waves and fracture," In *Proc. of Graphics Interfa*



ce 1999, pp. 193-202, 1999.

[18] B. Kang, I. Ihm, and C. Bajaj, "Extending the photon mapping method for realistic rendering of hot gaseous fluids," *Computer Animation and Virtual Worlds*, October, 2005. (to appear)

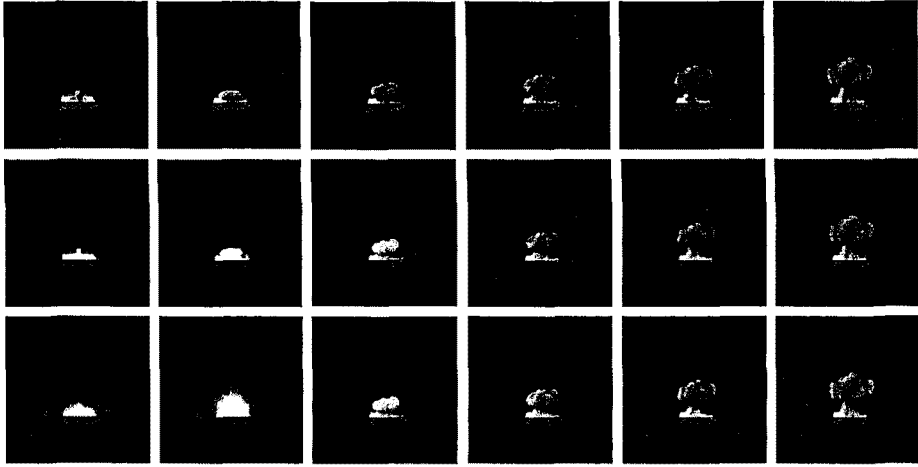


그림 6. 간단한 폭발에 대한 광선 추적법, 방사 포톤 맵, 섬광 포톤 맵의 적용

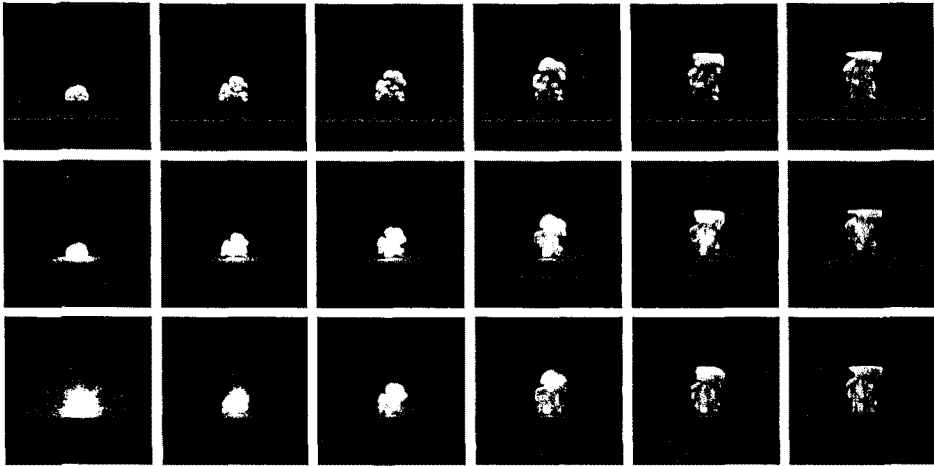


그림 7. 연쇄 반응 폭발에 대한 광선 추적법, 방사 포톤 맵, 섬광 포톤 맵의 적용

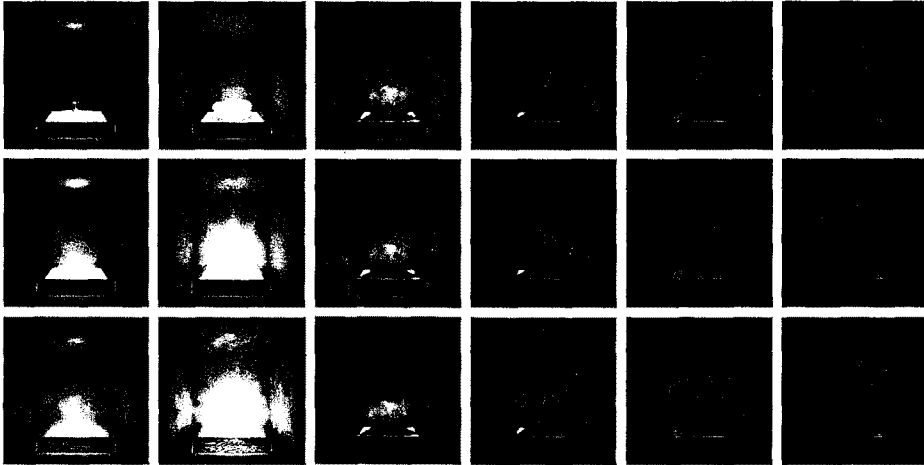


그림 8. 상자 안에서 폭발에 대한 방사, 섬광, 섬광반사 포톤 맵의 적용

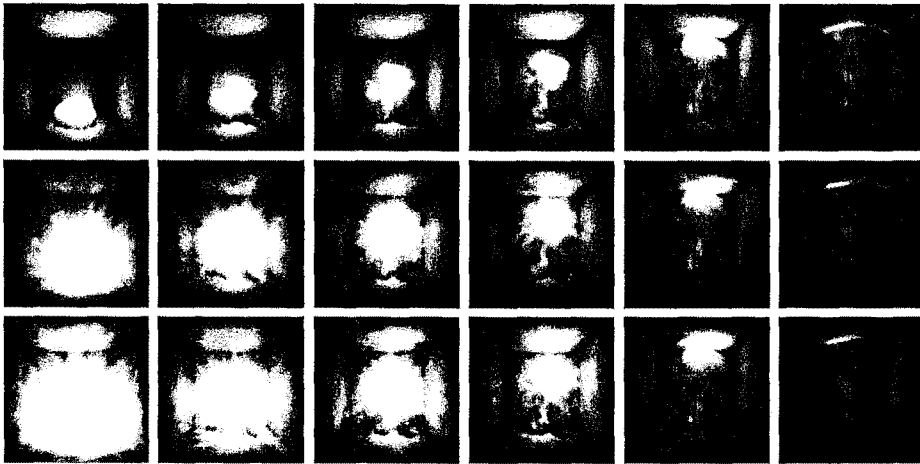


그림 9. 상자 안에서의 연쇄 반응 폭발에 대한 방사, 섬광, 섬광반사 포톤 맵의 적용

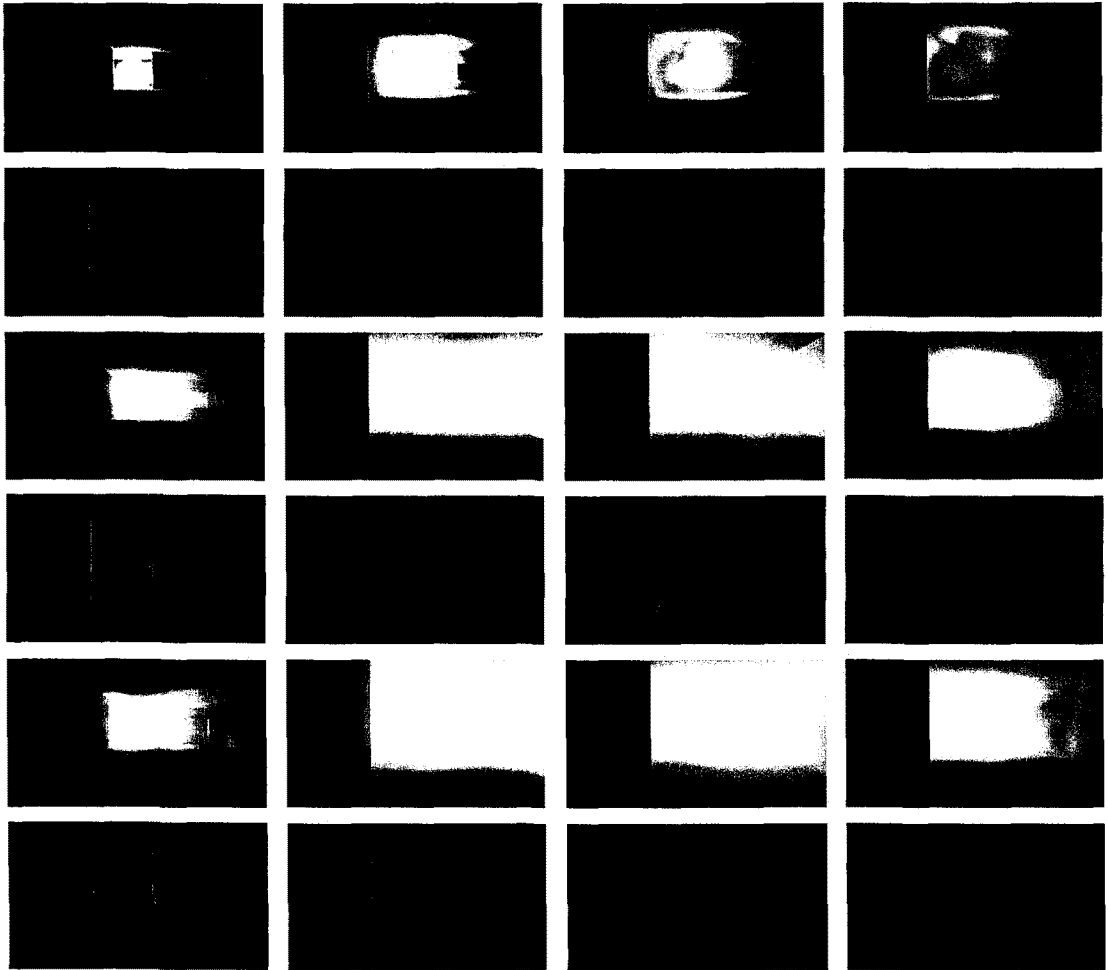


그림 10. 복잡한 물체 안에서 일어나는 폭발-방사, 섬광, 섬광 반사 포톤 맵의 적용(8 프레임 1조)

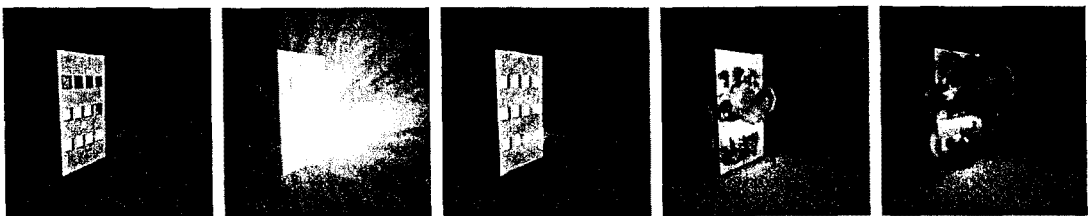


그림 11. 빌딩 안에서 일어나는 폭발 현상에 대한 렌더링 결과