

반투명 재질의 렌더링과 화면 보간을 위한 실시간 계층화 알고리즘

기현우, 오경수
숭실대학교 미디어학과
(kih^o, oks)^o@ssu.ac.kr

Real-Time Hierarchical Techniques for Rendering of Translucent Materials and Screen-Space Interpolation

Hyunwoo Ki, Kyoungsu Oh
Soongsil University

요 약

피부, 옷 등 실세계의 대부분의 물질들은 반투명한 재질로 되어있고, 부드러운 외양을 띄고 있다. 본 논문에서는 GPU 기반의 계층화 알고리즘을 통해, 양극 확산 (dipole diffusion) 기법에 기반한 표면 내에서의 빛의 산란에 의한 조명을 근사하여 반투명한 재질을 실시간에 렌더링하는 기법을 제안한다. 무수히 많은 수의 픽셀 빛 입자들은 GPU를 활용하여 쿼드트리로 계층화된다. 렌더링될 각 픽셀마다, 많은 빛 입자를 대신하여 좋은 화질로 근사할 수 있는 집합들을 선택하고, 이것을 사용하여 조명을 계산한다. 우리는 또한, 고해상도 이미지를 효율적으로 렌더링하기 위해 공간적 일관성과 early-z 컬링을 이용한 계층적 화면 보간 기법을 소개한다. 이를 위하여, 화면 정보를 GPU 상에서 계층화한다. 우리는 공간적 유사도가 높은 픽셀들을 하나의 픽셀로 렌더링함으로써 적응적으로 보간한다. 실험을 통해 빛 계층화를 통해 반투명한 물체를 실시간에 렌더링할 수 있음을 확인하였다. 화면 보간 기법은 동급 화질에서 렌더링 비용을 2~4배 정도 감소시켰다. 모든 과정은 GPU를 사용한 이미지 공간 상에서 빠르게 수행되며, 어떠한 긴 전처리과정도 필요하지 않는다.

ABSTRACT

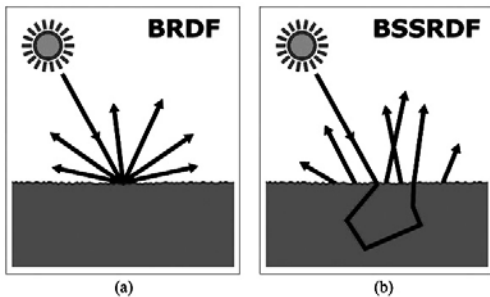
In the natural world, most materials such as skin, marble and cloth are translucent. Their appearance is smooth and soft compared with metals or mirrors. In this paper, we propose a new GPU based hierarchical rendering technique for translucent materials, based on the dipole diffusion approximation, at interactive rates. Information of incident light, position, normal, and irradiance, on the surfaces are stored into 2D textures by rendering from a primary light view. Huge numbers of pixel photons are clustered into quad-tree image pyramids. Each pixel, we select clusters (sets of photons), and then we approximate multiple subsurface scattering term with the clusters.

We also introduce a novel hierarchical screen-space interpolation technique by exploiting spatial coherence with early-z culling on the GPU. We also build image pyramids of the screen using mip-map and pixel shader. Each pixel of the pyramids is stores position, normal and spatial similarity of children pixels. If a pixel's similarity is high, we render the pixel and interpolate the pixel to multiple pixels. Result images show that our method can interactively render deformable translucent objects by approximating hundreds of thousand photons with only hundreds clusters without any preprocessing. We use an image-space approach for entire process on the GPU, thus our method is less dependent to scene complexity.

Keyword : interactive rendering, subsurface scattering, hierarchy, subsampling, hardware rendering

1.서론

비디오 게임을 위한 가상 세계를 실체처럼 표현하는데에 조명 모델은 매우 중요한 역할을 한다. 많은 조명 모델들은 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) [15] 모델을 사용한다. BRDF는 빛이 표면에 입사된 위치와 반사되어 나가는 위치가 동일하다고 가정한다 (그림 1.a). 이러한 가정은 표면 상의 반사율이 매우 높은 금속 물질 등을 렌더링할 때는 적합하지만 반투명한 재질에 대해서는 부정확한 이미지를 만든다. 반투명한 재질은 보다 부드러운 외양을 띄며, 이를 표현하기 위해서는 BSSRDF (Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function) [15] 모델을 필요로 한다. BSSRDF는 빛이 표면 상의 한 점에 입사된 뒤 물질의 내부에서 산란 (subsurface scattering) 하여 다른 점으로 나가는 것을 다룬다 (그림 1.b). 피부, 옷, 털, 과일, 돌, 우유, 종이 등 실제계의 대부분의 물질들은 반투명한 재질로 되어있기 때문에 BSSRDF는 사실적인 렌더링에 매우 중요하다 (그림 2). 하지만 BSSRDF를 위한 빛의 산란을 시뮬레이션하는 것은 매우 많은 계산을 필요로 하기 때문에, 주로 고품질의 영상을 요구하는 영화 등의 오프라인 환경에서 사용되며, 게임과 같은 의 실시간 환경에서는 거의 적용되지 못하고 있다.



[그림 1] BRDF (a)와 BSSRDF (b)에서의 빛의 이동의 비교. BSSRDF는 빛이 물질 내부에서 산란되는 것을 표현한다.



[그림 2] BRDF (좌)와 BSSRDF (우)로 렌더링한 결과의 비교. BSSRDF로 렌더링한 이미지에서는 날개와 같이 상대적으로 두께가 얇은 부분에서 반투명한 효과가 나타난다.

Jensen은 단일 산란 (single scattering)과 다중 산란 (multiple scattering)으로 구성된 실용적인 BSSRDF모델을 제안하였다 [11]. 특히, 다중 산란은 물질 내부의 알베도 (albedo; 산란율)가 높아서 빛의 산란 횟수가 증가하면, 빛이 확산되는 것에 착안하여 양극 확산 (dipole diffusion) 기법으로 근사하였다. 피부, 우유 등의 반투명한 재질들은 매우 높은 알베도를 가지기 때문에 다중 산란이 매우 중요하다 [9, 10, 11, 12]. 양극 확산 기법에 의한 근사는 매우 효율적이지만, 수많은 개수의 들어오는 빛 입자들을 고려해야 하기 때문에 여전히 많은 비용을 요구한다. 이렇게 무수히 많은 광원을 다루기 위해서는 몬테 카를로 샘플링 [4, 19]이나 계층적 클러스터링 기법 [12, 16, 21]을 사용한다. 몬테 카를로 샘플링은 대체로 좋은 성능을 보이거나 샘플 수가 부족할 때에 심각한 노이즈가 발생하며, 이를 완화하기 위하여 샘플 수를 증가시킬 경우 속도가 현저히 감소한다. 이에 반하여, 계층적 클러스터링 기법은 수많은 광원을 그들의 집합으로 대체함으로써, 매우 빠르게 수행될 수 있으며 샘플링 노이즈를 피할 수 있어 매우 효율적이다. 하지만 기존의 연구들 [12, 16, 21]은 실시간 환경에서 동작할 수 없을 뿐만 아니라, 이들의 복잡한 알고리즘은 GPU 상에서 수행하기에 적합하지 않았다.

반투명한 재질의 렌더링 기법은 대체로 CPU 기반의 오프라인 환경이다 [6, 7, 8, 11, 12]. PRT를 사용한 기법들은 실시간 렌더링이 가능하지만 매우 긴 전처리 시간을 필요로 한다 [9, 19, 22]. GPU를 활용한 기법들은 실시간 렌더링이 가능하지만, 이를 위하여 표면과 인접한 지역만을 샘플링하거나 3D 텍스처를 사용하는 등의 한계를 보였으며 [3], 여전히 전처리과정을 요구하여 동적인 장면에서는 적합하지 않았다 [2, 3, 9, 10]. 또한 정점의 개수가 증가함에 따른 렌더링 속도의 저하가 매우 심각했다 [3, 9, 10, 22]. 더욱이, 형태가 변하는 물체에 대해서는 적용될 수 없는 한계를 보였기 때문에 게임에서 사용되기 어렵다 [2, 3, 9, 10, 19, 22].

본 논문에서는 GPU 기반의 계층적 클러스터링 접근을 통해, 양극 확산 [11]에 의한 표면 내에서의 빛의 산란을 근사하여 반투명한 재질을 실시간 렌더링하는 기법을 제안한다. 우리의 기법은 어떠한 전처리 과정없이 실시간 동작하기 때문에 형태가 변형되는 물체에 대해서도 렌더링할 수 있다. 표면 상의 빛 정보는 광원 시점에서 렌더링한 2차원 이미지의 각 픽셀에 위치, 방향 및 조사도 (irradiance; 단위

면적당 들어오는 빛)를 저장함으로써 생성된다. 무수히 많은 수의 픽셀 빛 입자들은 GPU 상에서 맵과 픽셀 셰이더 처리를 통해 쿼드트리 구조의 이미지 피라미드 형태로 계층화된다. 트리의 리프 노드는 빛 입자이며, 중간 레벨의 각 노드에는 4개의 자식 노드들의 평균 조사도, 평균 위치 및 평균 방향을 저장한다. 또한, 이들 자식 노드들의 위치와 방향이 서로 유사한 정도를 저장한다. 렌더링 시 각 픽셀마다, 이 유사도를 고려하여 많은 빛 입자들을 대신하여 좋은 화질로 근사할 수 있는 클러스터 (cluster; 빛 입자들의 집합)를 선택하고, 이것을 사용하여 조명을 계산한다. 눈에서 멀리 떨어져있는 표면에서는 보다 상위 레벨 (루트 노드에 가까운 레벨)의 클러스터를 선택하여 보다 거칠게 근사함으로써 속도를 가속화한다.

우리의 기법은 매우 빠르지만, 고해상도 및 안티 앨리어싱된 이미지를 렌더링하기 위하여 무수히 많은 픽셀에 대하여 모두 계산하는 것은 여전히 많은 비용을 소비한다. 이에 따라 공간적 일관성과 early-z 컬링 기법을 이용하여, 화면을 적절히 보간하는 방법을 제안한다. 이를 위하여, 화면상의 픽셀들을 계층화하여 인접 픽셀들간의 변화가 적은 영역을 선정하고 보간한다. 우리의 기법은 기존의 보간 기법 [4]에서 발생했던 뭉개짐 (blur)과 계단 현상 (jaggy)을 모두 해결하여, 좋은 화질의 이미지를 보다 빠르게 렌더링하게 한다. 이러한 화면 계층화 기법은 우리의 빛 계층화 기법 뿐만 아니라 픽셀당 복잡한 연산을 수행하는 다른 기법들에서도 유용하게 사용될 수 있다.

우리의 기법은 계층적인 접근 방식을 사용함으로써 샘플링 노이즈를 피하고 형태가 변하는 물체를 매우 빠르게 렌더링할 수 있기 때문에 비디오 게임 등의 인터랙티브 환경에 적합하다. 우리의 기법은 많은 기존의 연구들과 유사하게 가려짐을 무시하고 [2, 3, 4, 10], 다중 산란만을 고려한 반투명한 재질의 렌더링만을 다룬다 [2, 3, 4, 9, 10]. 이러한 가정은 때때로 오류를 유발하지만, 충분한 현실감의 표현이 가능하다.

2. 관련 연구

반투명한 재질의 렌더링 기법들은 대체로 Jensen의 BSSRDF 모델 [11]을 따른다. Hanrahan과 Krueger는 BRDF를 사용하여 여러 계층으로 이루어진 재질에 대한 면하 산

란 (subsurface scattering)을 시뮬레이션하였고 [8], Dorsey는 입체 물질을 위한 포톤 매핑 기법으로 반투명한 돌을 렌더링하였다 [7]. 한 편, Jensen은 BSSRDF를 단일 산란과 다중 산란으로 나누고, 이 중 다중 산란을 양극 확산 기법으로 근사하였다. 이 기법은 대체로 효율적이지만, 알베도가 매우 높은 실세계의 대부분의 물질들에 대해서는 많은 샘플들을 필요로 하기 때문에 여전히 많은 비용을 필요로 한다. Lensch는 반투명한 재질의 렌더링을 래디오시티 (radiosity)와 유사한 방식으로 접근하였다 [10]. GPU를 활용하여 실시간 렌더링이 가능했지만, 텍스처 아틀라스 자료구조 및 긴 전처리 시간을 필요로 하였으며, 정점과 정점 간의 전송된 빛 에너지를 계산함에 따라 렌더링 속도가 정점의 개수에 매우 민감하였다. Carr는 그래픽스 하드웨어에 기반한 래디오시티 기법을 제안함과 함께, 이를 확장하고 맵맵을 활용하여 Lensch와 유사하게 다중 산란에 의한 조명을 계산하였다 [7]. 하지만 계층화 및 빛의 이동에 따른 경로를 연결하기 위해 전처리를 요구하였고, 특수한 형태의 자료구조 (multiresolution meshed atlas) [11]를 필요로 하였다. Dachsbarcher와 Stamminger는 렌더링될 표면에 인접한 영역을 맵맵을 활용한 특정 패턴으로 샘플링하여 실시간 렌더링하는 GPU 기반의 기법을 제안하였다 [3]. 하지만 여전히 전처리를 요구하고, 3D 텍스처를 필요로 하는 한계를 보였으며, 정점 갯수가 증가할수록 렌더링 속도가 급격히 감소했다. Hao는 각 정점 간의 빛의 이동을 미리 계산하여 보다 빠르고 우수한 화질로 렌더링할 수 있었지만, 이 역시 속도가 정점의 개수에 민감하고 매우 긴 전처리를 필요로 했다 [9]. 이들 실시간 렌더링 기법들은 모두 형태가 변하는 물체에 대해서는 적용될 수 없다. Sloan은 PRT를 사용하여 움직이는 물체 (예., 날개짓하는 박쥐)에 대한 실시간 렌더링을 하였고 [19], Wang은 역시 PRT를 사용하여, 단일 산란을 지원하는 반투명한 재질의 실시간 렌더링 기법을 제안하였다 [22]. 하지만 이러한 PRT 기반의 기법들은 극도로 긴 전처리 시간을 필요로 하였고, 형태가 심하게 변형되는 물체에 대해서는 적용될 수 없다.

계층적 클러스터링은 무수히 많은 가상의 점 광원 (또는 빛 입자)들을 트리 구조로 계층화한 뒤, 이들의 집합인 클러스터로 대체하여 조명을 빠르게 근사한다. Jensen은 물체 표면상의 빛 입자들을 옥트리로 만든 뒤, 루트에서부터 리프를 향하여 나누어가면서 (sub-dividing), 적절한 클러스터

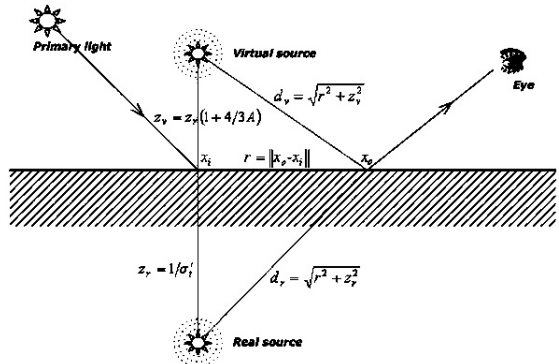
를 선정하고 이를 사용하여 다중 산란을 근사하였다 [12]. Paquette는 많은 수의 점 광원을 하향식으로 옥트리 구조로 만든 뒤, 역시 하향식으로 클러스터를 선정하고 선정된 클러스터를 사용하여 직접 조명을 근사하는 기법을 제안하였다 [16]. Walter는 면 광원, 환경맵 및 간접 조명을 다수의 가상점 광원으로 표현하고, Paquette의 발상을 기인하여 상향식으로 위치나 방향 등이 서로 유사한 가상 광원들을 묶어서 이진트리 형태의 광원 트리를 생성한 뒤, 더 밝은 광원을 대표 광원으로하여 조명을 근사를 하였다 [21]. 이러한 기법들은 광원 (또는 빛 입자)의 개수가 수만에서 수십만개로 늘어나도 낮은 비용으로 렌더링할 수 있다. 이 기법들은 현재 화면에서 매 픽셀마다 트리를 탐색하며 현재 클러스터를 조명 계산에 사용할 것인지 더 하위에 있는 클러스터를 사용할 것인지를 선정한다. 하지만 이러한 검사에는 많은 시간을 소요하였다. 또한 CPU 상에서만 동작할 수 있는 비실시간 기법이었다.

화면 보간은 적은 해상도의 버퍼에 렌더된 결과를 더 큰 해상도의 최종 해상도로 확대하여 렌더링을 가속화하는 것을 의미한다. Darchsbarcher와 Stamminger는 매 픽셀마다 복잡한 조명 계산을 하는 비용을 줄이기 위하여, 작은 해상도의 버퍼에 렌더링한 뒤 물체의 경계가 아닌 부분을 보간하였다 [4]. 하지만 샘플링 노이즈마저 보간되었고, 복잡한 장면이나 무늬가 있는 텍스처 매핑된 장면에서는 계단 현상이 눈에 띄었다. Walter는 공간적 일관성을 이용하여 하위 샘플링 (super-sampling)된 이미지 생성 시 효율적으로 보간을 하였지만 [20], 이 보간 기법은 그들의 빛 계층화 기법 [21]에만 적용될 수 있는 한계를 보였다.

3. 계층화를 통한 양극 확산 근사

피부, 우유 등의 반투명한 재질들은 매우 높은 알베도를 가진다. 따라서, 다중 산란이 매우 중요하며, 많은 연구들은 단일 산란을 무시한다 [2, 3, 4, 9, 10]. 다중 산란의 양극 확산 근사 [3]는 효율적이지만, 알베도가 높은 재질에 대해서는 여전히 많은 비용을 요구한다 [11, 12]. 피부, 페인트 칠해진 벽 등의 물질들은 여러 층으로 이루어져 있지만 이를 시뮬레이션하는 것은 매우 어려우며 [6, 8], 대체로 단층으로 표현해도 충분하기 때문에 많은 연구에서 단층으로 가정한다

다 [2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 19, 22]. 긴 렌더링 시간을 요구하는 오프라인 환경 [6, 7, 8, 11, 12]이나, 긴 전처리 시간을 필요로 하는 PRT [9, 20, 22] 등을 제외한 실시간 연구들은 계산을 간단화하기 위하여 물체 내부에서의 빛의 이동에서의 가려짐을 무시한 불투명한 물체로 가정한다 [2, 3, 10]. 이러한 가정들을 때때로 시각적 오류를 유발하지만, 다중 산란에 의한 조명에서는 나안으로 보기에 충분한 화질의 이미지를 생성할 수 있다. 우리의 기법 또한, 이러한 많은 이전 연구들과 같이 다중 산란만을 고려한 단층의 반투명한 재질을 가진 불투명한 물체를 렌더링하는 것으로 가정한다.



[그림3] Jensen의 dipole diffusion 기법 [11]의 도식화

- σ_a = the absorption coefficient t (given)
- $\sigma'_s = (1 - g)\sigma_s$, the reduced scattering (given)
- $\sigma'_t = \sigma_a + \sigma'_s$, the extinction coefficient t
- $\alpha' = \sigma'_s / \sigma'_t$, the reduced albedo
- $\sigma_{er} = \sqrt{3\sigma_a\sigma'_t}$, the effective extinction coefficient t
- $d_r = \sqrt{r^2 + z_r^2}$, the distance to the real source
- $d_v = \sqrt{r^2 + z_v^2}$, the distance to the virtual source
- $r = \|x_o - x_i\|$, the distance between x_i and x_o
- x_i, x_o = the incident and outgoing point of a surface (given)
- $z_r = 1/\sigma'_t$, $z_v = z_r(1 + 4/3A)$, $A = (1 + F_{dr})/(1 - F_{dr})$
- $F_{dr} = -1.440/\eta^2 + 0.710/\eta + 0.668 + 0.0636\eta$
- η = the relative refraction index (given)

[그림4] Dipole diffusion 근사를 위한 각 항목의 기술

이제, 이러한 가정을 바탕으로, 다중 산란에 의한 반투명한 재질의 렌더링 수식을 계층적인 접근으로 근사한다. 표면 상의 한 점 x_o 에서 $\vec{\omega}_o$ 방향으로 방출되는 방사도 (radiance), L_o ,은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$L_o(x_o, \bar{\omega}_o) = \int_A \int_{2\pi} S(x_i, \bar{\omega}_i; x_o, \bar{\omega}_o) L_i(x_i, \bar{\omega}_i) (\bar{n}_i \cdot \bar{\omega}_i) d\omega_i dA_{(x_i)} \quad (1)$$

여기서, L_i 는 x_i 에서 $\bar{\omega}_i$ 방향으로 들어오는 빛을 의미하며, S 는 BSSRDF이다.

Jensen의 BSSRDF는 단일 산란, $S^{(1)}$ 과 다중 산란, S_d , 로 구성된다 [11]. 여기서 다중 산란만을 고려하면,

$$S(x_i, \bar{\omega}_i; x_o, \bar{\omega}_o) = S^{(1)}(x_i, \bar{\omega}_i; x_o, \bar{\omega}_o) + S_d(x_i, \bar{\omega}_i; x_o, \bar{\omega}_o) \quad (2)$$

$$\approx S_d(x_i, \bar{\omega}_i; x_o, \bar{\omega}_o)$$

양극 확산 근사에 기반한 다중 산란 항목은 Fresnel 투과율, F_t 과 확산 BSSRDF 반사율, R_d ,로 표현된다 (그림 3).

$$S_d(x_i, \bar{\omega}_i; x_o, \bar{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \bar{\omega}_i) R_d(\|x_i - x_o\|) F_t(\eta, \bar{\omega}_o) \quad (3)$$

$$R_d(r) = \frac{a'}{4\pi} \left\{ z_v \left(\sigma_v + \frac{1}{d_r} \right) \frac{e^{-\sigma_v r}}{d_r^2} + z_v \left(\sigma_v + \frac{1}{d_r} \right) \frac{e^{-\sigma_v r}}{d_r^2} \right\} \quad (4)$$

F_t 는 Schlick [18]의 근사를 통해 빠르게 구할 수 있다. R_d 를 계산하기 위한 각 항목들은 재질의 광학적 속성에 따라 달라지며, 측정된 데이터 [11]를 활용하여 쉽게 계산할 수 있다. 그림 4는 식 5에 사용된 항목들을 기술한다. L_s 가 물체 표면 상의 빛 입자들의 집합 S 로부터 야기된 조명일 때, 양극 확산에 의한 조명식으로 쓰면 다음과 같다,

$$L_s(x_o, \bar{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \bar{\omega}_o) \int_S R_d(\|x_i - x_o\|) E(x_i, \bar{\omega}_i) dA_{(x_i)} \quad (5)$$

$$E(x_i, \bar{\omega}_i) = \int_{2\pi} F_t(\eta, \bar{\omega}_i) L(x_i, \bar{\omega}_i) (\bar{n}_i \cdot \bar{\omega}_i) d\omega_i \quad (6)$$

이 때, 모든 주 광원을 점 광원이나 상수 광원으로 가정하면 조사도, E ,는 다음과 같이 간단해진다.

$$E(x_i, \bar{\omega}_i) = F_t(\eta, \bar{\omega}_i) I(\bar{n}_i \cdot \bar{\omega}_i) \quad (7)$$

여기서, $I(\bar{n}_i \cdot \bar{\omega}_i)$ 는 법선벡터 (normal), \bar{n}_i , 방향을 향하고 있는 주 광원에서 $\bar{\omega}_i$ 방향으로 들어오는 빛의 밝기이다. 우리는 식 5의 적분을 이산화하여 구할 수 있다.

$$L_s(x_o, \bar{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \bar{\omega}_o) \sum_{i \in S} R_d(\|x_i - x_o\|) E(x_i) \quad (8)$$

식 8의 계산량은 표면 상의 빛 입자들의 개수에 비례하기 때문에, 높은 비용을 요구한다. 우리는 무수히 많은 빛 입자들로부터의 조명 L_o 를 빛 입자들의 집합들을 사용하여 낮은 비용으로 근사할 수 있다 $O(N) \rightarrow O(\log N)$. 만일 L_c 가 표면 상의 빛 입자들의 부분 집합, $C \subseteq S$,으로부터 야기된 조명일 때, 클러스터를 구성하는 빛 입자들이나 하위 클

러스터들이 서로 공간적 그리고 방향적으로 매우 유사하면, 이들의 평균 위치, 방향 및 밝기의 합을 사용하여 근사할 수 있다.

$$L_c(x_o, \bar{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \bar{\omega}_o) \sum_{i \in C} R_d(\|x_i - x_o\|) E(x_i, \bar{\omega}_i) \quad (9)$$

$$\approx \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \bar{\omega}_o) R_d(\|x_c - x_o\|) E(x_c, \bar{\omega}_c)$$

여기서, $E(x_c, \bar{\omega}_c)$ 는 x_c 에서 $\bar{\omega}_c$ 방향으로 들어오는 클러스터의 조사도이다. 다중 산란에 의한 조명은 대체로 저주파수를 띄기 때문에, 클러스터의 기하 정보로써 평균값 (즉, 저주파수)을 사용하는 이러한 근사로도 충분히 좋은 화질을 보인다.

최종적으로, 3장에서와 같이 $\bar{\omega}_o$ 방향에서 바라본 표면 상의 한 점 x_o 에서의 BSSRDF에 의한 조명은 모든 클러스터로부터의 조명, L_c ,의 합으로 근사될 수 있다.

$$L_o(x_o, \bar{\omega}_o) \approx \sum_{clusters C} L_c(x_o, \bar{\omega}_o) \quad (10)$$

$$= \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \bar{\omega}_o) \sum_{clusters C} R_d(\|x_c - x_o\|) E(x_c, \bar{\omega}_c)$$

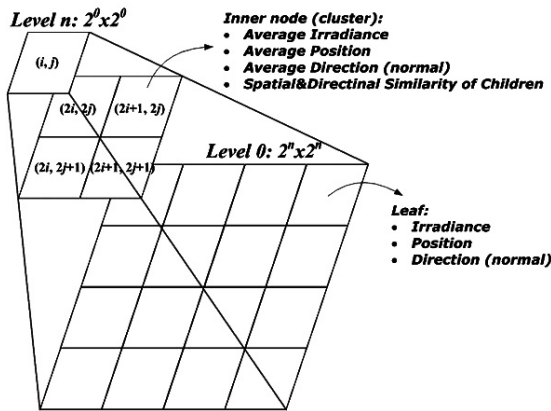
클러스터의 위치, 방향 및 조사도는 빛의 계층화 단계에 서 계산하며, 그래픽스 하드웨어에서의 자동 밍맵을 통해 계산된 값을 이용하기 때문에 매우 쉽고 빠르게 수행된다. 따라서, 렌더링 시에는 오로지 $F_t(\eta, \bar{\omega}_o)$ 와 R_d 항목만 계산하면 된다.

4. 빛의 계층화: 반투명한 재질의 렌더링

우리는 반투명한 재질의 계층적 렌더링을 위하여 물체 표면 상의 빛 입자들을 쿼드트리 구조의 이미지 피라미드로 만든다. 쿼드트리 이미지 피라미드는 $2^n \times 2^n$ 개의 픽셀을 가진 0 레벨부터, $2^0 \times 2^0$ 개의 픽셀을 가진 n 레벨까지의 이미지들의 계층적인 모음으로, 완전한 쿼드트리 구조이다. 서브 레벨 이미지의 각 픽셀 (i, j)에는, 하위 레벨 이미지, 즉, 고해상도 이미지의 4개의 픽셀들, ($2i, 2j$), ($2i, 2j+1$), ($2i+1, 2j$), ($2i+1, 2j+1$), 을 자식 노드로 갖는다 (그림 5).

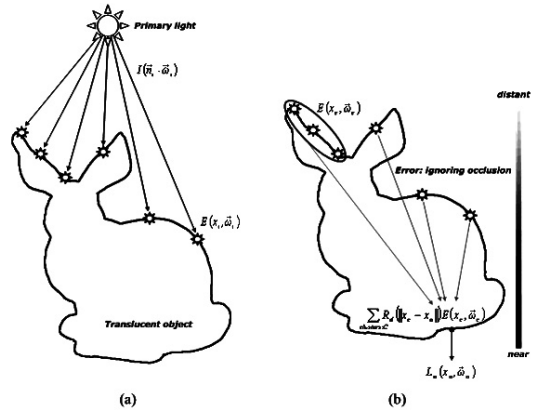
우리의 알고리즘은 크게 세 단계로 이루어진다. 먼저, 빛 입자를 생성한다. 우리는 트리의 리프 노드에 해당하는 이미지들의 각 픽셀에 각 빛 입자의 위치, 방향 및 조사도를

저장한다. 우리는 표면 상에 인접한 빛 입자만을 샘플링하는 [3, 4]와는 달리 표면 상의 모든 빛 입자들부터의 조사도를 고려한다. 또한 GPU에 최적화된 자료구조와 트리 탐색 기법 등을 통해 [2]와는 달리 특이한 자료구조와 전처리 과정을 필요로 하지 않는다. 주 광원 시점에서 바라본 물체를 렌더링한 그림자 맵의 각 픽셀에 광원으로부터의 거리 뿐만 아니라 위치, 방향 및 조사도 정보를 저장한다 (그림 6.a). 다음으로 이 이미지들을 이미지 피라미드로 만든다. 트리의 중간 노드 (클러스터) 에 해당하는 서브 레벨 이미지의 각 픽셀에는 자식 노드들의 평균 위치, 평균 방향, 평균 조사도 및 자식 노드들간의 공간적 유사도를 저장한다 (그림 5). 평균 위치, 평균 방향 및 평균 조사도에 대한 피라미드는 그래픽스 하드웨어에 의한 자동 밍맵을 사용하여 쉽게 만들 수 있다. 유사도는 각 서브 레벨 이미지에 대한 렌더링으로 구하며, 픽셀 셰이더에서 각 픽셀마다 하위 레벨의 사분면 픽셀들 (자식 노드들) 간의 위치와 방향이 서로 유사할수록, 그리고 리프에 가까운 노드일수록 더 높은 가중치를 준다. 위치의 유사도는 그림자 맵에 저장된 z값을 사용하 스퀈라 비교를 하며, 방향의 유사도는 내적 연산을 사용하므로 빠르게 수행된다. 리프 노드는 항상 최대값, 즉, 1로 설정한다.



[그림 5] 빛 계층화를 위한 이미지 피라미드의 도식화

이제 렌더될 각 픽셀마다, 쿼드트리를 하향식의 너비우선으로 탐색하며 적합한 유사도를 가진 클러스터를 선정한다. 화면으로부터의 거리가 가까울수록 리프 노드에 가까운 클러스터를 선정하여 보다 정확하게 근사하며, 화면에서 먼 픽셀에서는 루트 노드에 가까운 클러스터를 선정하여 거칠게 근사한다 (그림 6.b).

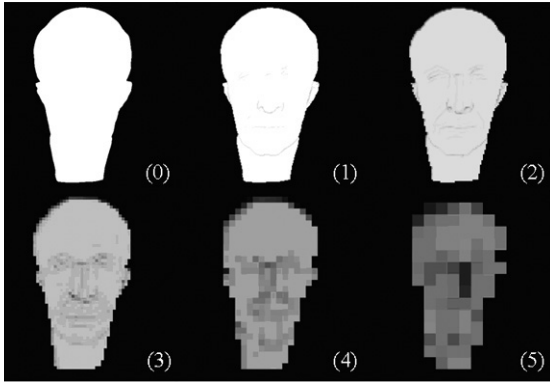


[그림 6] 반투명한 재질을 위한 빛 계층화 : (a) 빛 입자 생성, (b) 클러스터를 사용한 조명 계산

쿼드트리를 GPU 상에서 하향식의 너비우선으로 탐색하기 위하여, 트리의 각 하위 레벨별로 렌더링을 수행한다. 렌더될 각 픽셀에서 이전 레벨에서 적합한 유사도 (유저에 의해 정의된 값보다 큰 경우)를 가졌는지를 검사하고, 부적합한 경우, 현재 레벨의 4개의 자식들에 대하여 각각의 적합성을 검사한다. 이 때, 적합한 자식 노드만이 조명 근사에 사용되며, 부적합한 자식 노드는 차후에 다시 이러한 검사를 하게 된다. 최악의 경우, 항상 리프 노드까지 탐색을 해야하므로 부하가 커진다. 이를 막기위하여, 한계 레벨을 정하여 한계 레벨에서의 모든 노드는 항상 적합한 것으로 간주한다. 한계 레벨이 루트에 가까울수록 렌더링 속도는 향상되지만, 화질의 손상을 갖는다. 기존의 기법들은 [12, 16, 21] 클러스터 선정을 위해 복잡한 계산을 필요로 하였다. 이러한 계산은 GPU 상에서 수행되기 어려운 뿐만 아니라, 게임 등을 위한 실시간 렌더링에는 적합하지 않다. 우리는 화면으로부터 렌더링될 픽셀의 월드 공간 상의 위치까지의 거리에 따라 클러스터의 선정 여부를 결정한다. 이 때, 거리와 클러스터에 저장된 유사도의 단순한 스퀈라 비교만을 수행하기 때문에 매우 빠르게 처리된다.

우리는 렌더링 패스를 줄이기 위해서, 루트 노드와 루트에 가까운 노드 (고레벨)에 대한 패스를 생략하였다. 그림 7에서와 같이, 이들 레벨에서의 유사도는 매우 낮다. 따라서, 우리는 8x8의 해상도를 갖는 7레벨부터 하향식으로 진행하였으며, 계층화 또한 7레벨까지만 수행했다.

이러한 계층화의 정도에 대한 기준은 유저에 의해 정의되며, 제안된 알고리즘은 모든 과정이 실시간에 수행되기 때문에 유저는 결과를 직접 확인하면서 쉽게 적합한 값을 찾을 수 있다.



[그림 7] 계층화된 빛 입자의 예. 계층화가 될수록(숫자가 커질수록) 인접한 빛 입자들간의 위치적/방향적 유사도가 낮아져서 어둡게 표현된다 (외곽의 검정 부분은 온 배경을 나타낸다).

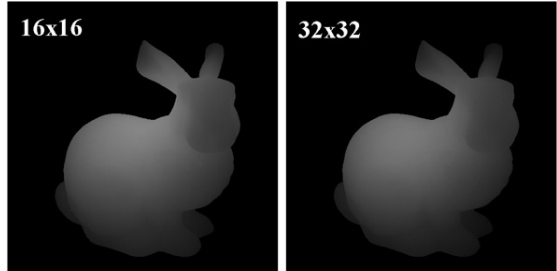
4.1 빛의 계층화 결과

이번 절에서는 빛의 계층화를 통한 반투명한 재질의 렌더링의 결과를 기술한다. 프레임 버퍼와 지연 셰이딩(deferred shading) [4, 5, 14, 17]을 위한 버퍼 (화면 공간 상에서의 위치, 방향, 반사광 저장) 및 빛 입자를 저장하는 이미지의 해상도는 512x512이며, 그래픽 카드로는 ATI X1900 GTX 512MB를 사용하였다. 그림 2는 가고일 모델을 렌더링한 결과로, BSSRDF를 사용한 우측 그림은 BRDF를 사용한 좌측 그림에 비하여 반투명성을 잘 표현한다. 상대적으로 두께가 얇은 날개 부분이 물체 내부에서의 빛의 산란 현상에 의해 밝게 나타났다.

우리는 한계 레벨을 바꿔보며, 성능을 실험해보았다. 표 1과 그림 9는 34,834 개의 정점과 69,451 개의 삼각형을 가진 스텐포드 버니 모델을 최대 16x16 (256) 개의 클러스터로부터 조명을 근사하는 한계 레벨 6으로 렌더링한 결과와 최대 32x32 (1,024) 개의 클러스터로부터 조명을 근사하는 한계 레벨 5로 렌더링한 결과를 비교한 것이다. 한계 레벨 6를 사용하면 2.6배 가량 더 빠른 성능을 보였지만 두 이미지의 화질은 거의 동일하였고, 이로써 우리는 한계 레벨 6으로도 충분한 것을 확인하였다.

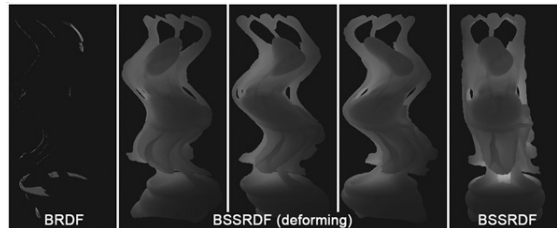
	정점/삼각형	레벨 6 (16x16)	레벨 5 (32x32)
추전차	12,888/25,440	36.15 fps	13.73 fps
버니	34,834/69,451	29.74 fps	11.30 fps

[표 1] 한계 레벨에 따른 렌더링 성능 (정적인 장면)



[그림 8] 스텐포드 버니: 한계 레벨에 따른 화질의 비교 (좌: 레벨 6 - 16x16, 우: 레벨 5 - 32x32). 한계 레벨 6으로도 충분한 화질을 제공함을 보여준다.

다음으로, 형태가 변하는 물체를 렌더링해보았다. 그림 9는 연속 촬영된 이미지로써, 부처 모델을 사인파 (sine wave)에 맞춰 몸을 뒤틀도록 애니메이션을 준 것이다. 기존의 기법들 [2, 3, 9, 10, 19, 22]은, 고정된 물체 상에서 전달된 빛 에너지를 미리 계산한 뒤 렌더링 시 사용하기 때문에, 형태가 변하는 물체를 실시간 렌더링하지 못하였다. 하지만, 우리의 기법은 모든 과정이 실시간에 수행되기 때문에 움직이는 물체에 대해서도 사용될 수 있다. 정적인 장면에 대해서는 계층화 작업을 생략할 수 있기 때문에 성능이 향상된다.



[그림 9] 형태가 변하는 Happy Buddha: 좌: BRDF, 나머지: BSSRDF. 주 광원이 뒤쪽에 비추고 있음에도 BSSRDF에서는 전체적으로 밝게 나타나고 상대적으로 두꺼운 머리와 배는 약간 어둡게 표현된다.

	정점/삼각형	정적인 장면	동적인 장면
추전차	12,888/25,440	36.15 fps	23.53 fps
얼굴	25,445/50,801	29.45 fps	19.24 fps
버니	34,834/69,451	29.74 fps	19.82 fps

[표 2] 우리의 기법의 렌더링 성능 (한계 레벨 6: 16x16)

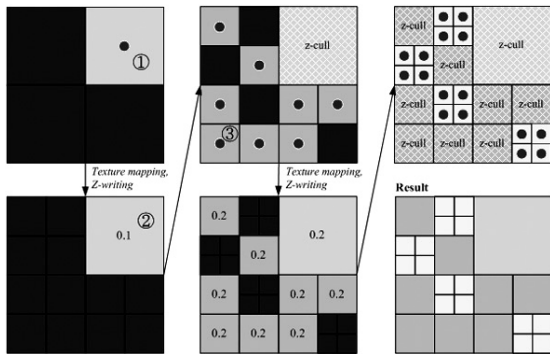
표 2는 한계 레벨 6으로 렌더링한 여러가지 장면의 성능을 기록한 것이다. 우리의 기법은 기존의 GPU 기반의 기법들과는 달리, 모든 과정을 GPU만을 사용하였으며 계층적인 접근 방법을 사용함으로써 샘플링 노이즈 없는 이미지

를 생성하였다. 모든 과정을 이미지 공간 상에서 처리함으로써 정점의 개수가 성능에 크게 영향을 주지 않았다.

5. 화면의 계층화: 적응적인 화면 보간

우리의 계층적 접근을 통한 반투명한 재질의 렌더링은 샘플링에 의한 방법보다 빠르지만, 고해상도, 특히 안티 앨리어싱된 이미지를 생성하기 위하여 무수히 많은 픽셀에서 식 10에 의한 조명 근사를 수행하는 것은 여전히 많은 비용을 요구한다. 이미지 상의 픽셀들은 대체로 공간적 일관성이 높기 때문에 (예, 바닥, 벽), 우리는 이러한 특성을 고려하여 적절하게 보간하는 방법을 소개한다.

빛 계층화에서와 유사한 단계를 거친다. 먼저, 현재 화면 상에서의 위치와 방향을 이미지에 저장한다. 이 과정은 지연 셰이딩 [4, 5, 14, 17]의 첫 단계이기도 하다. 이 이미지들을 빛 계층화와 유사하게 쿼드트리로 계층화한다. 위치와 방향은 그래픽스 하드웨어 상의 자동 맵핑을 사용하여 이미지 피라미드를 만든다. 공간적 일관성을 저장할 이미지 피라미드의 각 서브 레벨 이미지에는, 각 픽셀의 자식 픽셀들이 서로 위치적 그리고 방향적으로 유사한 정도를 픽셀 셰이더를 통해 저장한다.



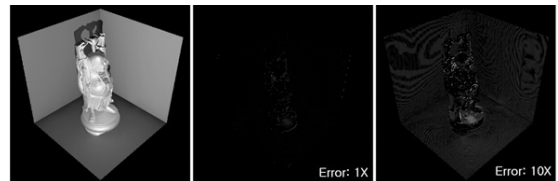
[그림 10] 상위 레벨부터 공간적 일관성이 높은 픽셀을 렌더링한 뒤, 다음 레벨에 매핑함으로써 빠르게 보간한다.

이제 하향식의 멀티패스로 렌더링한다. 빛 계층화에서와 유사하게, 루트에 가까운 레벨 (저해상도) 부터 렌더링한다 (루트 노드에 가까운 레벨은 공간적 일관성이 매우 낮기 때문에 128x128 해상도를 갖는 레벨 2부터 시작하였다). 만일 공간적 일관성이 높은 픽셀은 렌더링을 수행하고, 그렇지

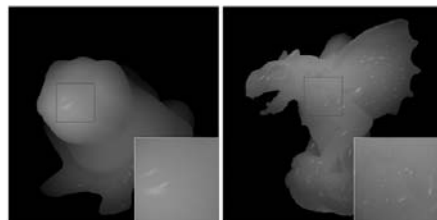
않으면 아무 값도 쓰지 않는다. 렌더된 이미지를 다음 레벨 (고해상도) 이미지에 매핑함으로써 보간을 수행하고, early z 컬링을 위해 z-버퍼에 z값을 기록한다. 이러한 작업을 최종 해상도 (리프 노드)까지 반복한다 (그림 10). 여기에서는 빛 계층화와는 달리 복잡한 트리 탐색을 필요로하지 않으며, early z 컬링에 의하여 이미 렌더되어 이미 보간된 픽셀들은 처리하지 않기 때문에 매우 빠르다. 이러한 화면 보간은 우리의 기법 뿐만 아니라, 픽셀 당 복잡한 계산을 필요로 하는 다른 기법들 (예, 범프 매핑) 에 모두 적용 가능하여 게임 등에서 매우 유용할 것이다.

5.1 화면의 계층화 결과

우리의 화면 계층화를 통한 적응적인 화면 보간 기법의 실험 결과를 기술한다. 역시 512x512 해상도에 렌더링한 결과를 분석한다. 빛 계층화를 위한 한계 레벨은 6 (16x16)을 사용하였다. 복잡한 장면, 특히 텍스처를 사용한 장면에서는 작은 해상도 (64x64)에 렌더링한 뒤 보간하는 [4]의 화면 보간 방법을 사용하면 심하게 뭉개지며, 계단 현상이 눈에 띄게 나타난다. 그림 11은 우리의 반투명한 재질 렌더링이 아닌 다른 전역 조명 렌더링에 적용한 것으로, 화면 계층화를 통한 보간 기법은, 최종 해상도에 바로 렌더링 결과와 거의 유사한 화질을 보이는 것을 보여준다. 그림에도 불구하고, 3.5배 가량 렌더링 시간이 적게 들었다 (표 3). 이는 벽과 바닥 등의 평평한 부분이 많아서 보간이 많이 수행되기 때문이다.



[그림 11] 좌측 이미지는 보간된 이미지이다. 보간하지 않은 이미지와의 오차는 거의 눈에 띄지 않는다 (가운데). 우측 이미지는 눈으로 식별하기 좋게, 오차를 10배 키운 것이다.



[그림 12] 화면 보간을 적용한 반투명한 재질의 렌더링. 복잡한 물체에 대해서도 화질의 손상이 수행될 수 있다.

	정점/삼각형	화면 보간	보간하지 않음
Teapot	12,888/25,440	90.39 fps	36.15 fps
Buddha	24,975/50,000	68.21 fps	26.32 fps
Max Plank	25,445/50,801	73.63 fps	29.45 fps
Bunny	34,834/69,451	76.02 fps	29.74 fps

[표 3] 화면 계층화를 통한 적응적인 보간의 효과 (정적인 장면)

그림 12는 우리의 반투명한 재질의 렌더링에 화면 보간 기법을 적용한 것으로, 우측 하단은 클로즈업된 이미지를 나타낸다. 왼쪽의 개구리 모델은 319.8K개의 정점과 296.2K개의 삼각형, 오른쪽의 가고일 모델은 196.3K개의 정점과 392.6K개의 삼각형을 가진 매우 복잡한 형태의 모델이다. 우리의 화면 보간 기법은 이렇게 매우 복잡한 장면에 대해서도, 화질의 손상없이 수행될 수 있음을 보여준다.

6. 결론과 향후 연구

우리는 GPU 기반의 빛 계층화를 통해 반투명한 재질의 렌더링을 실시간에 수행하는 기법을 제안하였다. 기존의 CPU 기반의 비실시간 기법들에 비하여 월등히 향상된 속도를 보였고, 기존의 GPU 기반의 실시간 기법들에 비하여 움직이는 물체를 지원하였고, 모든 과정이 전처리없이 실시간에 수행될 수 있었다. 또한 화질과 속도가 정점의 개수에 영향을 적게 받았다.

공간적 일관성을 이용한 우리의 계층적 화면 보간 방법은 변화가 적은 픽셀들을 적절히 보간하여 고해상도의 이미지를 효과적으로 렌더링하였다. 이 기법은 추가 메모리를 요구하지만, 우리의 반투명한 재질의 렌더링이 아닌 다른 기법을 사용한 게임 등에 적용하여 렌더링을 가속화할 수 있다.

우리의 기법은 기존의 기법들과는 달리 어떠한 전처리 과정도 요구하지 않기 때문에, 비디오 게임, 가상 현실 등의 대화형 시스템에서 매우 유용할 것이다. 뿐만 아니라 영화 등에서 사용할 오프라인 이미지를 생성할 때, 미리보기의 용도로써도 매우 유용하게 쓰일 것으로 기대한다.

우리의 반투명한 재질의 렌더링은 몇 가지 가정에 의한 한계 (예, 다중 산란만을 고려)가 있었지만, 많은 경우에 시각적으로 충분한 화질을 보였다. 향후 연구에서 단일 산란

을 포함한 완전한 조명을 계산할 수 있도록 할 것이다. 또한 시간적 일관성을 고려하여, 매우 동적인 장면에서도 튀는 현상을 제거하고, 보다 렌더링을 가속화할 것이다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원 및 2006년도 정부 재원(문화관광부)으로 한국게임산업개발원의 지원을 받아 연구되었습니다.

참고 문헌

- [1] Carr, N. A. and Hart, J. C. 2002. Meshed atlases for real-time procedural solid texturing. *ACM Trans. Graph.* 21, 2 (Apr. 2002), 106-131.
- [2] Carr, N. A., Hall, J. D., and Hart, J. C. 2003. Gpu algorithms for radiosity and subsurface scattering. In *HWWS '03: Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS conference on Graphics hardware*, Eurographics Association, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 51-59.
- [3] Dachsbacher, C., and Stamminger, M. 2003. Translucent shadow maps. In *Proceedings of the 14th Eurographics workshop on Rendering. (2003)*, Eurographics Association, pp. 197-201.
- [4] Dachsbacher, C., and Stamminger, M. 2005. Reflective shadow maps. In *SI3D 05: Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games*, ACM Press, New York, NY, USA, 203-231.
- [5] Deering, M., Winner, S., Schediwy, B., Duffy, C., and Hunt, N. 1988. The triangle processor and normal vector shader: a VLSI system for high performance graphics. In *Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques* R. J. Beach, Ed. SIGGRAPH '88. ACM Press, New York, NY, 21-30.
- [6] Donner, C. and Jensen, H. W. 2005. Light diffusion in

- multi-layered translucent materials. *ACM Trans. Graph.* 24, 3 (Jul. 2005), 1032-1039.
- [7] Dorsey, J., Edelman, A., Jensen, H. W., Legakis, J., and Pedersen, H. K. 1999. Modeling and rendering of weathered stone. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, 225-234.
- [8] Hanrahan, P. and Krueger, W. 1993. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques SIGGRAPH '93*. ACM Press, New York, NY, 165-174.
- [9] Hao, X. and Varshney, A. 2004. Real-time rendering of translucent meshes. *ACM Trans. Graph.* 23, 2 (Apr. 2004), 120-142.
- [10] Lensch, H., Goesele, M., Bekaert, Ph., Kautz, J., Magnor, M., Lang, J., and Seidel, HP. 2002. Interactive rendering of translucent objects, *Proceedings of Pacific Graphics 2002*, pp. 214 – 224.
- [11] Jensen, H. W., Marschner, S. R., Levoy, M., and Hanrahan, P. 2001. A practical model for subsurface light transport. In *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques SIGGRAPH '01*. ACM Press, New York, NY, 511-518.
- [12] Jensen, H. W. and Buhler, J. 2002. A rapid hierarchical rendering technique for translucent materials. In *Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques* (San Antonio, Texas, July 23 - 26, 2002). SIGGRAPH '02. ACM Press, New York, NY, 576-581.
- [13] Keller, A. 1997. Instant radiosity. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, 49-56.
- [14] Molnar, S., Eyles, J., and Poulton, J. 1992. PixelFlow: high-speed rendering using image composition. In *Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques* J. J. Thomas, Ed. SIGGRAPH '92. ACM Press, New York, NY, 231-240.
- [15] Nicodemus, F. E., Richmon, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W., and Limperis, T. 1977. Geometric considerations and nomenclature for reflectance. *NBS Monograph 160*, National Bureau of Standards, Washington, DC, Oct.
- [16] Paquette, E., Poulin, P., and Drettakis, G. 1998. A light hierarchy for fast rendering of scenes with many lights. *Computer Graphics Forum* 17, 3, 63-74.
- [17] Pharr, M. and Fernando, R. 2005. *GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation*. Addison-Wesley. NVidia, 2005. p. 880.
- [18] Schlick, C. 1994. An inexpensive BRDF model for physically-based rendering. *Proc. Eurographics'94, Computer Graphics Forum*, 13, 3, p233-246, 1994.
- [19] Shirley, P., Wang, C., and Zimmerman, K. 1996. Monte Carlo techniques for direct lighting calculations. *ACM Trans. Graph.* 15, 1 (Jan. 1996), 1-36.
- [20] Sloan, P., Luna, B., and Snyder, J. 2005. Local, deformable precomputed radiance transfer. *ACM Trans. Graph.* 24, 3 (Jul. 2005), 1216-1224.
- [21] Walter, B., Fernandez, S., Arbree, A., Bala, K., Donikian, M., and Greenberg, D. P. 2005. Lightcuts: a scalable approach to illumination. *ACM Trans. Graph.* 24, 3 (Jul. 2005), 1098-1107.
- [22] Wang, R., Tran, J., and Luebke, D. 2005. All-frequency interactive relighting of translucent objects with single and 다중 산란. *ACM Trans. Graph.* 24, 3 (Jul. 2005), 1202-1207.

부록: 트리 탐색 셰이더 코드 (32x32 노드 탐색)

```

half4 psMultipleScattering32x32( FRAGMENT_IN frag ) : COLOR
{
    half4 result = 0,0f;

    // retrieve the terms from deferred shading buffers
    half3 wsPos = tex2D(DSSample0, frag.texcoord).xyz;
    half3 normal = tex2D(DSSample1, frag.texcoord).xyz * 2,0f - 1,0f;
    half3 material = tex2D(DSSample2, frag.texcoord).xyz;

    // level 4 (32x32)
    half4 cluster;
    float4 uv = 0,0f;
    uv.w = 4;
    for (int i = 0; i <= loopCount; ++i) // loopCount equals 255
    {
        uv.x = tex_offset[5] * fmod(i, 16,0f);
        uv.y = tex_offset[5] * (i / 16,0f);
        uv.xy += tex_offset_half[5];

        // gathering lights if it did not contribute at previous level
        if (AdaptiveBound(5, uv, LCSample))
        {
            uv.xy -= tex_offset_half[4]; // left-top
            cluster = tex2Dlod(LCSample, uv);
            if (AdaptiveBound(4, uv, LCSample))
                result.xyz += illumination(cluster.xyz, wsPos, normal, uv);

            uv.x += tex_offset[4]; // right-top
            cluster = tex2Dlod(LCSample, uv);
            if (AdaptiveBound(4, uv, LCSample))
                result.xyz += illumination(cluster.xyz, wsPos, normal, uv);

            uv.y += tex_offset[4]; // right-bottom
            cluster = tex2Dlod(LCSample, uv);
            if (AdaptiveBound(4, uv, LCSample))
                result.xyz += illumination(cluster.xyz, wsPos, normal, uv);

            uv.x -= tex_offset[4]; // left-bottom
            cluster = tex2Dlod(LCSample, uv);
            if (AdaptiveBound(4, uv, LCSample))
                result.xyz += illumination(cluster.xyz, wsPos, normal, uv);
        }

        result.xyz *= material * intensityScale;
        result.w = 1,0f;

        return result;
    }
}

```



기현우 (Hyunwoo Ki)

2005.08 숭실대학교 미디어학부(학사)

2005.09~ 숭실대학교 미디어학과(석사)

관심분야: Realistic/Artistic Rendering, Appearance Modeling, Visual Effects, Interactive Application, Game Design



오경수 (Kyoungsu Oh)

1994 서울대학교 계산통계학과(학사)

1996 서울대학교 전산학과(석사)

2001서울대학교 전기 컴퓨터 공학부(박사)

2001~2002 (주)조이엔트 개발팀장

2003~ 현재 숭실대학교 미디어학부 조교수

관심분야: Real-Time Computer Graphics, Game