

## 미세면 분포 함수 변형을 통한 고품질 실시간 금속 렌더링

강영민  
 동명대학교 게임공학과  
 ymkang@tu.ac.kr

# High-quality Realtime Rendering of Metallic Surface with Microfacet Distribution Function Deformation

Young-Min Kang  
 Tongmyong University

## 요 약

본 논문은 실시간 응용 프로그램에서 사실적인 금속 재질을 렌더링하기 위한 효과적인 기법을 제안한다. 제안된 기법은 금속면의 미세한 흠집을 표현하기 위해 법선 벡터를 섭동(perturbation)하는 방법을 사용한다. 법선 벡터를 섭동하는 일반적인 방법은 범프(bump) 매핑이나 법선(normal) 매핑 등의 방법을 사용하는 것이다. 그러나 이러한 방식은 이방성 반사 특성을 갖는 표면에서는 사실적인 빛의 산란을 보이지 못한다. 금속 특유의 반사를 표현하기 위해서는 미세면 분포 함수를 이용하여 이방성 반사 특성을 모델링하는 것이 일반적이므로 일반적 법선 섭동만으로는 만족스런 결과를 얻지 못한다. 본 논문은 법선 벡터의 섭동과 함께 미세면 분포 함수를 변형하는 기법을 통해 매우 사실적인 금속면 재질 렌더링이 가능한 기법을 제안한다. 제안된 기법은 쉽게 GPU 프로그램으로 구현되며, 실시간 환경에서 동작한다.

## ABSTRACT

An effective method to render realistic metallic surface in realtime application is proposed. The proposed method perturbs the normal vectors on the metallic surface to represent small scratches. In general, bump map or normal map method is used to generate normal vector perturbation. However, those methods do not show plausible light scattering when applied to anisotropic reflection surface. In order to express metallic surface reflectance, MDF-based BRDF is generally employed. Therefore, the simple normal perturbation does not produce satisfactory metal rendering results. The proposed method employs not only normal perturbation but also deformation of the microfacet distribution function(MDF) that determines the reflectance properties on the surface. The MDF deformation increases the realism of metal rendering. The proposed method can be easily implemented with GPU programs, and works well in realtime environments.

**Keyword** : Realtime rendering, anisotropic reflection, metal rendering, MDF deformation.

접수일자 : 2010년 10월 18일 일차수정 : 2010년 11월 30일 심사완료 : 2010년 12월 ??일

※ 본 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. [10035184, 실시간 스트리밍 기반의 게임 서비스 기술]

## 1. 서 론

본 논문에서는 그림 1과 같은 사실적인 금속 표면 렌더링을 실시간에 수행할 수 있는 절차적 기법을 제안한다. 금속면의 반사 특성을 표현하기 위해 이방성(anisotropic) 반사 모델들이 사용되지만, 그림 1과 같이 미세한 흠집에 의해 나타나는 금속면 특유의 반사 특성을 표현한 기법은 많지 않다.



[그림 1] 제안된 기법을 통한 실시간 금속 렌더링

컴퓨터 그래픽스 분야에서 미세면 모델을 이용하여 금속면의 렌더링을 수행한 모델은 Torrance와 Sparrow가 제안한 모델이다[1]. 이들은 렌더링의 대상이 되면 면이 완벽한 거울의 특성을 갖는 매우 작은 미세면들의 집합이라 가정했다. 이런 표면 모델의 반사 특성은 미세면 분포 함수(MDF, microfacet distribution function)로 결정된다.

이러한 미세면 모델은 다양한 방식으로 개선되어 여러 반사 특성을 표현하는 데에 적용되었다. Blinn 등은 표면의 거친 정도를 제어할 수 있는 미세면 모델을 제안하기도 하였다[2,3]. Cook과 Torrance는 Blinn 등이 제안한 모델을 개선한 모델을 제안하였다[4].

매끄러운 금속면은 주위 환경을 거울처럼 반사하는 특성을 가지고 있다. 그러나 우리가 일상적으로 만나는 대부분의 금속면은 특정한 방향으로 솔질이 된 미세한 흠집을 가지고 있거나, 방향을 예측할 수 없는 작은 흠집들을 가지고 있다. 이러한 흠집들은 금속면이 거울과 달리 독특한 반사 특성을 갖도록 한다. 이러한 독특한 반사 특성은 금속면의 흠집이 가진 방향에 따라 결정되기 때문에 일반적으로 이방성(anisotropic) 특질을 가진다. 이방성 반사 특성을 표현하기 위한 여러 가지 모델들이 제안되었다[5,6,7]. Ashikhmin과 Shirley는 직관적인 제어 변수를 사용한 이방성 반사 모델을 제안하였다[8,9]. 제안된 미세면 분포 함수(MDF)는 두 개의 파라미터로 쉽게 제어되며 솔질로 미세한 흠집이 일정한 방향으로 형성된 금속면을 표현하는 데에 매우 적합한 모델이다.

이방성 반사 특성을 이용하여 금속을 표현한 경우는 많았으나, 금속 표면의 미세한 흠집까지 사실적으로 표현하는 모델은 그다지 많지 않았다. Wang 등은 측정된 양방향 반사 분포 함수(BRDF)를 복수의 로브(lobe)로 근사하는 방식을 제안하였다. 이 방법은 실시간에 다양한 재질을 표현할 수 있으며, 6차원 공간 가변 양방향 반사 분포 함수(SVBRDF)를 일반적인 미세면 모델과 몇 개의 구면 로브(lobe)로 표현한다[10]. 이 방법은 금속면을 포함한 여러 가지 재질을 표현할 수 있으나, 측정된 BRDF 데이터를 요구한다는 단점이 존재한다. 작은 흠집들에 의해 발생하는 빛의 산란을 표현할 수 없다.

본 논문은 2장에서 측정 데이터를 사용하지 않고도 금속면의 미세한 흠집이 나타내는 반사 특성을 효율적으로 표현할 수 있는 기법을 제안하며, 3장에서 이 기법을 적용한 결과를 분석하고, 4장에서 제안된 기법의 가치와 활용 가능성을 살펴본다.

## 2. 이방성 반사 모델을 이용한 금속면 표현

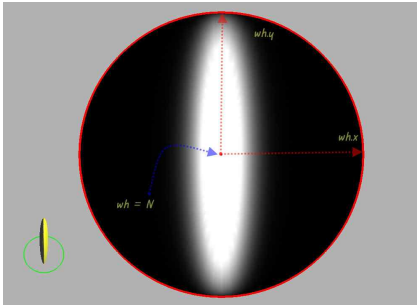
이 장에서는 금속 표면의 반사를 표현하는 절차적 기법을 소개할 것이다. 제안된 기법은 미세표면

모델을 기반으로 하며, 금속면의 특수한 반사특성을 표현하기 위해 미세한 흠집을 법선 벡터 섭동을 통해 표현하고, MDF 변형을 통해 더욱 사실적인 금속면 렌더링 결과를 얻는 방법을 제안한다.

## 2.1 이방성 반사 특성을 가진 미세면 모델

미세면 모델의 반사 특성은 앞서 설명한 바와 같이 MDF인  $D(\omega_h)$ 에 의해 결정된다. 이 함수는 미세면의 법선 벡터가  $\omega_h$ 와 일치할 확률을 반환하는 함수이다. Ashikhmin 등은 [9]에서 다음과 같은 MDF를 통해 이방성 반사 특성을 표현하였다.

$$D(\omega_h) = \frac{\sqrt{(e_x+1)(e_y+1)}}{2\pi} (\omega_h \cdot \mathbf{n})^{e_x \cos^2 \phi + e_y \sin^2 \phi} \quad (\text{식 } 1)$$

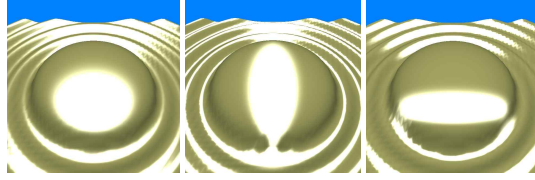


[그림 2] 2차원 미세면 분포 함수(MDF)

이때  $\omega_h$ 는 광원벡터와 시선벡터의 중간 벡터이며,  $e_x$ 와  $e_y$ 는 반사의 이방성을 제어하는 MDF의 지수이며,  $\phi$ 는  $\omega_h$ 의 방위각을 나타낸다.  $e_x$ 와  $e_y$ 를 이용하여 반사의 이방성을 쉽게 제어할 수 있다.  $\omega_h$ 가 단위 벡터이기 때문에 이 벡터는  $(\omega_{hx}, \omega_{hy}, \sqrt{1-\omega_{hx}^2-\omega_{hy}^2})$ 로 표현할 수 있다.

그림 2는  $e_x$ 와  $e_y$ 의 값을 서로 다르게 주어 식 1을 통해 얻은 이방성 미세면 분포 함수의 예이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 입사된 에너지는 탄젠트 공간의  $x$ 축과  $y$ 축 방향으로 서로 다른 정도로 산란된다. 이는 표면이 거친 정도가 방향에 따라 다른 경우를 의미하며, 이런 이방성 MDF는

금속면의 독특한 반사 특성을 표현하는 데에 적합하다. 본 논문에서는 금속면이 이러한 이방성 반사를 가지고 있다고 가정한다.



(a)  $e_x = 20, e_y = 20$  (b)  $e_x = 200, e_y = 10$  (c)  $e_x = 10, e_y = 200$   
[그림 3] 등방성 반사(a)와 이방성 반사(b,c)의 비교

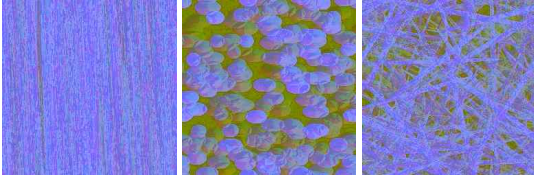
그림 3은 이방성 반사 특성을 변경함에 따라 물체의 표면이 어떻게 표현되는지를 비교하고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 이방성 반사 특성을 제어함으로써 금속면의 독특한 반사를 표현할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 금속면에 근접한 카메라를 통해 렌더링한 장면에서 금속면 표면의 흠집과 그 흠집에 의한 빛의 산란 등을 표현하지 못하고 매끈한 표면만을 생성한다. 본 연구에서는 금속면 위의 흠집과 그 효과를 표현하여 더욱 사실적인 금속면을 렌더링할 수 있다.

## 2.2 미세면 모델에 대한 법선 섭동의 한계

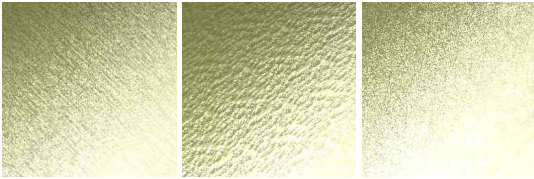
법선 벡터를 조작하여 메시의 실제 기하 복잡도보다 더 높은 복잡도의 기하 굴곡을 표현하려는 노력이 지속적으로 있었다[11,12,13]. 범프 매핑은 그래픽스 분야에 매우 잘 알려진 기법이며, 범프 매핑(bump mapping)이 렌더링 과정에서 법선 벡터의 섭동을 계산하는 과정을 포함한다는 단점을 해소한 것이 법선 매핑(normal mapping)이다[11].

본 논문은 금속면에 형성된 작은 흠집들에 의해 나타나는 독특한 반사 특성을 표현하려고 한다. 이를 위해 금속면의 흠집은 법선 벡터를 흔들어 놓는 방식을 사용하였다. 그림 4는 본 논문에서 제안된 기법을 적용하기 위해 활용한 흠집 맵(map)의 몇 가지 예들과 해당 흠집 맵이 적용되었을 때에 렌더링 되기를 기대하는 표면의 모습을 보이고 있

다. 이 흠집 맵들은 반복적으로 연결했을 때 이음새가 드러나지 않는 텍스처이며, 절차적 방법을 통해 자동 생성되었다.



(a) 세 종류의 자동 생성된 흠집 맵



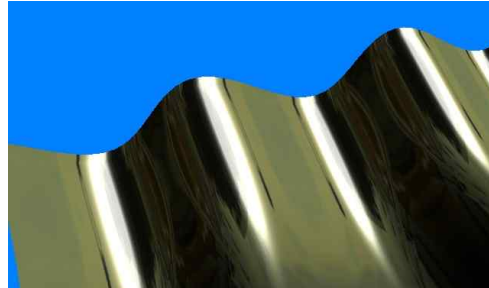
(b) 흠집 맵이 적용된 표면에서 기대되는 렌더링 결과

[그림 4] 흠집 맵의 적용: (a) 법선 맵 형태로 생성된 흠집 맵 (b) 흠집 맵에 의해 기대되는 표면 렌더링

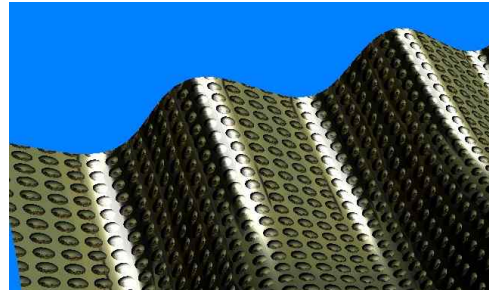
Heidrich와 Seidel은 법선 매핑이 적용된 기하 객체에 지역적 Blinn-Phong 음영법을 적용하였다. 이 방법은 두 단계의 렌더링 과정을 통해 난반사와 정반사 효과를 각각 따로 렌더링하였다[12]. 이러한 렌더링 방식은 한 번의 단계로 반사도를 결정하는 BRDF 모델에 적용할 수 없다. 특히 이방성 반사의 경우 대부분 MDF에 의해 결정되는 BRDF 모델로 표현되는 경우가 일반적이데[13], 이러한 이방성 반사 모델들에 범프 매핑이나 법선 매핑을 적용하면 굴곡이 형성된 면의 법선만 변경될 뿐이어서 굴곡면에서 왜곡되는 반사 특성을 충분히 표현할 수 없다는 단점이 있다. 변위(displacement) 맵 등을 이용하여 표면의 굴곡을 표현하는 방법들[14,15,16] 역시 낮은 수준의 기하 복잡도를 가진 메쉬에 높은 수준의 기하 복잡도를 표현하는 데에만 관심을 두고 굴곡면에서의 이방성 반사 등의 다양한 반사 특성을 재현하는 데에는 크게 관심을 두고 있지 않다.

그림 5는 이방성 반사 특성을 같은 미세면 기반 BRDF를 통해 렌더링한 표면에 법선 매핑을 통해

굴곡을 생성했을 때의 문제를 잘 보이고 있다.



(a) 이방성 반사 특성을 가진 BRDF를 이용한 렌더링



(b) 법선 매핑을 이방성 반사 표면에 적용한 결과

[그림 5] 이방성 반사 표면의 법선 벡터 섭동 결과

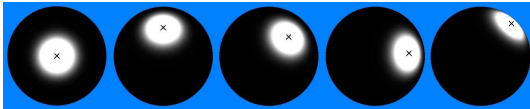
그림 5의 (a)는 식 (1)로 표현되는 Ashikhmin과 Shirley의 이방성 반사 모델을 적용한 표면의 모습이다. 이 표면에 법선 매핑을 통해 굴곡을 생성한 결과가 그림 5의 (b)이다. 법선 매핑을 통해 자연스러운 돌기를 잘 표현할 수 있다. 그러나 각각의 돌기를 살펴보면, 표면 전체에서 나타나는 이방성 반사 특성이 돌기에서는 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

### 2.3 미세면 분포 함수 변형 기법 개념

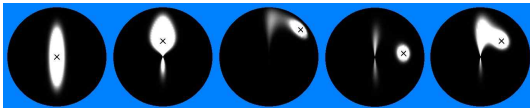
그림 5의 (b)와 같이 법선 벡터를 조작하여 생성한 돌기의 표면이 자연스럽지 못한 이유는 법선 벡터가 변경되어 입사 에너지를 돌기 표면의 입사 에너지만 변경하기 때문이다. 입사 에너지가 변경되면 굴곡이 나타나기는 한다. 하지만 반사도를 결정하는 미세면 분포 함수 MDF는 광원 벡터와 시

선 벡터의 중간 벡터인  $\omega_h$ 에 의존적이며, 새롭게 돌출된 표면의 어느 곳도  $\omega_h$ 가 변경되지 않는다. 식 (1)의 MDF는 독립 변수로  $\omega_h$ 만이 존재한다. 실제 식을 보면 법선 벡터  $\mathbf{n}$ 이 존재하지만, 탄젠트 공간에서 법선 벡터는 언제나  $(0,0,1)$ 이므로, 실제로 변화하는 값은  $\omega_h$  하나뿐이었던 것이다. 그러나 법선 매핑 등의 방법으로 법선을 섭동하여 반사도를 변경하려면 식 (1)의  $\mathbf{n}$  역시 바뀌어야 한다. 표면의 원래 법선을  $\mathbf{n}$  이라고 할 때, 섭동된 법선을  $\tilde{\mathbf{n}}$ 라고 하자. 그러면 식 (1)의 MDF는  $D(\omega_h, \mathbf{n})$ 이라고 할 수 있으며, 법선 매핑 등이 적용된 경우에는  $D(\omega_h, \tilde{\mathbf{n}})$ 을 적용해야 정반사 성분이 섭동된 법선 벡터를 따라 움직이게 될 것이다. 이러한 방식은 Heidrich와 Seidel이 [12]에서 적용한 방식이다. 이제 MDF는 다음과 같이 표현된다.

$$D(\omega_h, \tilde{\mathbf{n}}) = \frac{\sqrt{(e_x+1)(e_y+1)}}{2\pi} (\omega_h \cdot \tilde{\mathbf{n}})^{e_x \cos^2 \phi + e_y \sin^2 \phi} \quad (\text{식 } 2)$$



(a) 등방성 MDF에서 법선 섭동 효과



(b) 이방성 MDF에서 법선 섭동 효과

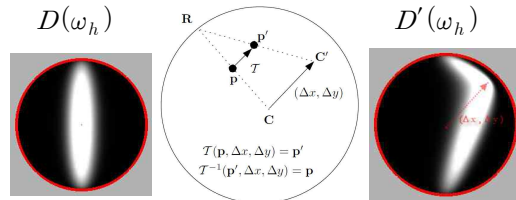
[그림 6] 섭동된 법선을 식(2)에 적용한 MDF

그림 6은 법선 벡터가  $\tilde{\mathbf{n}}$ 로 섭동 될 때 MDF인  $D(\omega_h, \tilde{\mathbf{n}})$ 의 모양이 어떻게 변화하는지를 보이고 있다. 그림 6의 (a)는 등방성 반사를 (b)는 이방성 반사 특성을 가진 MDF이다. 이때 각각의 가장 왼쪽에 있는 MDF가 법선 벡터의 섭동이 없는 상태에서의 MDF이며, 곱하기 표시가 그려진 지점이 법선 벡터가 섭동되어 가리키는 위치이다.

그림에서 보는 바와 같이 등방성 반사 MDF는

자연스럽게 섭동된 벡터 중심으로 정반사 영역이 옮겨감을 확인할 수 있다. 그러나 그림 6의 (b)에서 볼 수 있는 바와 같이 이방성 반사 특성을 갖는 MDF의 경우에는 섭동된 벡터를 파라미터로 계산했을 때에 이방성 반사의 원형이 전혀 유지되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 이방성 반사 특성을 갖는 표면에 대해 법선 섭동을 수행할 경우 법선 섭동에 의해 돌출되거나 들어간 형태로 보이는 영역에서 정확한 이방성 반사가 재현되지 않는 것이다. Heidrich와 Seidel은 등방성 반사 특성을 가진 재질을 표현했기 때문에 특별한 문제가 발생하지 않았던 것이다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 법선 벡터가 변경될 때, 원래의 반사 특성을 유지한 모습으로 MDF가 변형되어야 한다. 그림 7의 (a)는 이방성 MDF의 한 가지 예이며, 그림 7의 (c)는 이 이방성 MDF를 법선 벡터 섭동의 양인  $(\Delta x, \Delta y)$ 에 맞게 변형한 결과이다.

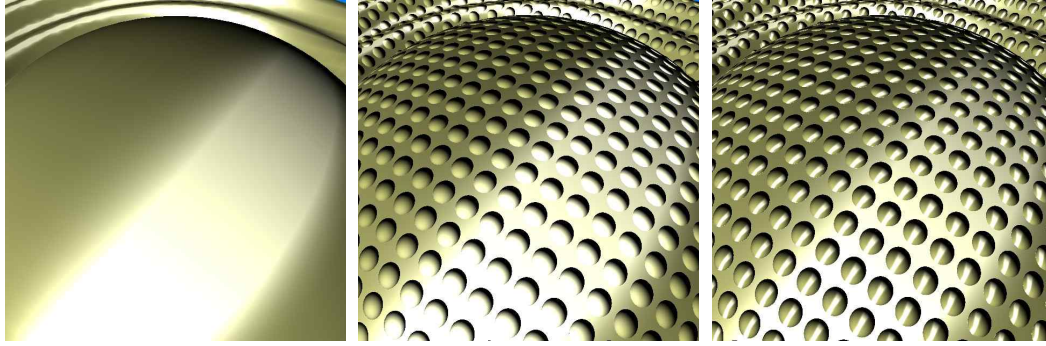


(a)원 MDF (b) MDF 변형 개념 (c) 변형 MDF

[그림 7] MDF 변형의 개념과 대응점 사이의 관계

7의 (a)와 같은 원래의 MDF를  $D(\omega_h)$ 라고 하면, 그림 7의 (c)와 같이 변형된 MDF는  $D'(\omega_h)$ 로 표현할 수 있다. 이를 구하는 것은 매우 간단한 작업이다. 그림 7의 (b)는 MDF 변형 전후의 대응점을 보이고 있다. 원래의 MDF인  $D(\omega_h)$ 가 정의되는 원형 공간내의 어떤 점  $\mathbf{p}$ 는 중심  $\mathbf{C}$ 가  $(\Delta x, \Delta y)$ 만큼 이동하여  $\mathbf{C}'$ 로 옮겨갈 때 그림 8에서와 같이 어떤 점  $\mathbf{p}'$ 로 따라서 움직여야 한다. 이러한 움직임을 일으키는 변환을  $T(\mathbf{p}, \Delta x, \Delta y)$ 라고 하자. 원래의 중심  $\mathbf{C}$ 에서 출발하여  $\mathbf{p}$ 를 지나는 선이 닫는 원주





(a) 이방성 반사 특성의 표면 (b) 법선 섭동에 의한 굴곡 표현 (c) MDF 변형으로 사실성 증대

[그림 8] MDF 변형에 의한 법선 벡터 섭동 기법의 사실성 증대 효과

위의 한 점을  $\mathbf{R}$  이라고 하자.  $T(\mathbf{p}, \Delta x, \Delta y)$ 의 역함은  $\mathbf{p}$ 가 선분  $\overline{\mathbf{RC}}$ 를 나누는 비율로 선분  $\overline{\mathbf{RC}'}$ 를 나누는 지점  $\mathbf{p}'$ 를 구하고,  $\mathbf{p}$ 를 옮겨 놓는 것이다. 따라서  $T(\mathbf{p}, \Delta x, \Delta y)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$T(\mathbf{p}, \Delta x, \Delta y) = \mathbf{p} + \frac{|\overline{\mathbf{Rp}}|}{|\overline{\mathbf{RC}}|}(\Delta x, \Delta y) \quad (\text{식 3})$$

식 2를 이용하여 우리는 그림 7의 (c)와 같은 변형된 MDF를 구할 수 있다. 그러나 식 3을 이용하여 그림 7의 (a)와 같은 MDF 전체를 변형하는 작업은 시간이 매우 많이 소요된다. 더구나 렌더링이 수행되는 각 픽셀들은 서로 다른 법선 벡터 섭동을 가진다. 이는 MDF 변형을 픽셀마다 수행해야 한다는 것이다. 물론 이런 비현실적인 방식으로 렌더링을 수행할 수는 없다.

실제 렌더링 기법을 구현할 때에는 새로운 MDF인  $D'(\omega_h)$ 는 전혀 구하지 않고 원래의 기본 MDF인 식 1의  $D(\omega_h)$ 만을 사용한다. 이는 MDF 변형 변환  $T(\mathbf{p}, \Delta x, \Delta y)$ 의 역변환  $T^{-1}(\mathbf{p}, \Delta x, \Delta y)$ 을 구하면 가능하다. 다시 말해, 개념적으로는  $D'(\omega_h)$ 를 사용하지만, 실제 계산은 이와 동가이며 계산하기 용이한  $D(T^{-1}(\omega_h))$ 를 사용하는 것이다.

식 3으로 표현되는 변환  $T(\mathbf{p}, \Delta x, \Delta y)$ 의 역변환  $T^{-1}(\mathbf{p}, \Delta x, \Delta y)$ 은 다음과 같이 쉽게 구할 수 있다.

$$T^{-1}(\mathbf{p}', \Delta x, \Delta y) = \mathbf{p}' - \frac{|\overline{\mathbf{Rp}}'|}{|\overline{\mathbf{RC}}'|}(\Delta x, \Delta y) \quad (\text{식 4})$$

이제 법선 벡터가  $(\Delta x, \Delta y)$ 만큼 섭동된 지점의 광반사 강도를 계산하기 위해서는 간단히 MDF를  $D(T^{-1}(\omega_h, \Delta x, \Delta y))$ 와 같이 사용하면 된다.  $\Delta x$ 와  $\Delta y$ 가 섭동된 벡터의 탄젠트 공간에서의  $x, y$ 좌표와 일치하므로,  $D(T^{-1}(\omega_h, \Delta x, \Delta y))$ 는  $D(T^{-1}(\omega_h, \tilde{\mathbf{n}}))$ 으로 표현할 수 있다.

이 방법에서는  $\omega_h$ 를 벡터가 섭동된  $D'(\omega_h)$  공간에서 사용하는 것이 아니라 섭동되기 이전의 공간에 적용하기 때문에 법선 벡터가 탄젠트 공간에서 (0,0,1)인 상태를 유지할 수 있다. 따라서 우리가 적용하는 MDF 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} D'(\omega_h, \tilde{\mathbf{n}}) &= D(T^{-1}(\omega_h, \tilde{\mathbf{n}}), \mathbf{n}) \\ &= \frac{\sqrt{(e_x+1)(e_y+1)}}{2\pi} (T^{-1}(\omega_h, \tilde{\mathbf{n}}), \mathbf{z})^{e_x \cos^2 \phi + e_y \sin^2 \phi} \end{aligned} \quad (\text{식 5})$$

그림 8는 MDF 변형의 효과를 보이고 있다. 그림 8의 (a)는 Ashikhmin과 Shirley의 이방성 반사 모델을 이용하여 렌더링된 표면이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 특정한 축의 방향으로 정 반사 성분이 길게 늘어나 있음을 확인할 수 있다. 이러한 표면에 단순한 법선 매핑을 적용한 결과가 그림 8의 (b)이다. 법선 벡터가 섭동되었기 때문에

입사 에너지가 변경되고 이에 따라 자연스러운 굴곡면이 렌더링됨을 알 수 있다. 그러나 튀어나온 돌기의 반사 함수는 원래의 표면과 동일하기 때문에 새로운 정반사 특성을 생성하지 못하고 그림 8의 (a)의 반사 특성이 그대로 드러나고 있다. 그림 8의 (c)는 섭동된 법선 벡터에 따라 MDF를 변형한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 법선 벡터 섭동을 통해 생성된 돌기들이 새롭게 정반사 성분을 생성하며 굴곡면 각각이 그림 8의 (a)에서 나타나는 이방성 반사 특성을 보여주고 있다.

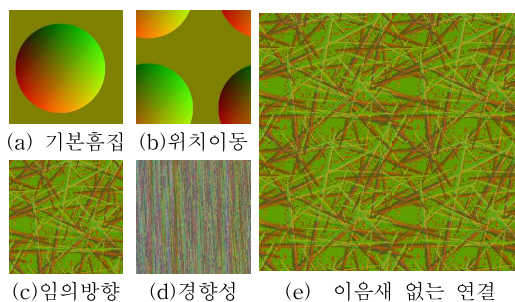
## 2.4 법선 섭동을 위한 흠집 텍스처의 생성

앞서 설명한 바와 같이 금속면의 자연스러운 표현을 위해 본 논문에서 제안한 기법은 작은 흠집을 이방성 반사 표면에 새겨 넣는 방식을 사용한다. 이러한 흠집은 법선 벡터를 섭동하는 법선 맵의 형태로 생성할 수 있다. 그림 4의 (a)에서 이러한 흠집 맵의 예들을 이미 살펴보았다.

흠집 맵들은 수작업을 통해 생성할 수도 있으나, 절차적 방법으로 자동 생성하는 것이 효율적이다. 본 논문의 기법을 테스트하기 위해 우리는 표면에 오목한 반구형 구덩이를 새겨 넣는 법선 맵을 생성하는 것을 기본 연산으로 하였다. 탄젠트 공간에서 이 반구형 구덩이의 법선은 매우 간단히 계산할 수 있다. 그림 9의 (a)는 이러한 반구형 구덩이를 생성할 수 있는 법선 맵의 예를 보이고 있다. 이러한 구덩이는 텍스처 공간 내에서 임의의 위치로 중심을 이동할 수 있다. 이 경우 그림 9의 (b)와 같이 법선 벡터가 섭동되는 원형의 공간이 텍스처 공간을 넘어갈 수 있다. 이 때 텍스처 좌표의 상한과 하한을 넘어가는 공간에 새겨지는 텍스처를 그림 9의 (b)처럼 반대편 경계에서 다시 시작하게 하면 이음새 없는 텍스처를 생성할 수 있다. 이러한 구덩이 모양의 법선 섭동은 중심의 이동, 반지름의 조작을 가할 수 있으며, 구덩이의 깊이도 제어할 수 있다. 이와 함께 다양한 방향으로 크기를 늘릴 수도 있다. 무작위의 방향으로 크기 변경을 하게되면 그림 9의 (c)처럼 예측할 수 없는 방향으

로 흠집이 생긴 표면을 표현할 수 있는 텍스처가 생성되며, 일정한 방향성을 갖도록 하여 생성하면 그림 9의 (d)처럼 솔질된 금속면의 흠집과 같은 형태의 텍스처를 얻을 수 있다.

그림 9의 (e)는 이렇게 생성된 텍스처가 이음새 없이 연결됨을 보이고 있다.

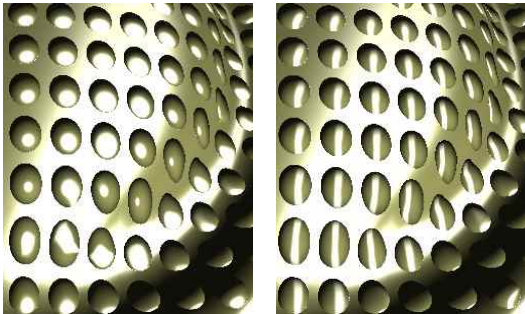


[그림 9] 흠집 텍스처 생성의 기본 개념

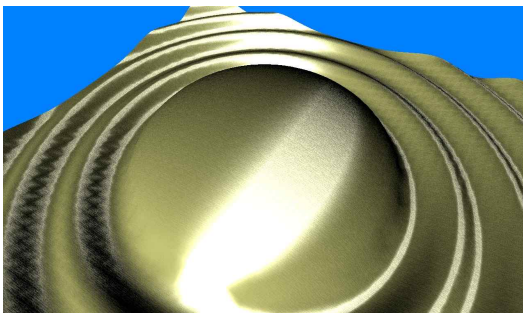
## 3. 실험 결과

본 논문에서 제안된 기법의 성능과 품질을 평가하기 위해 제안된 기법을 OpenGL 셰이딩 언어 (GLSL)을 이용하여 GPU 프로그램으로 구현하였으며 일반적 수준의 iMac 컴퓨터에서 실행하였다.

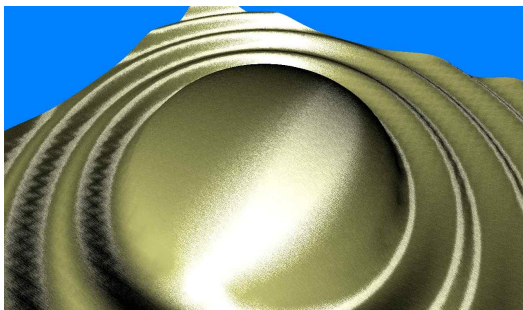
그림 10은 제안된 기법과 단순 법선 매핑의 특성을 비교하고 있다. 이 그림의 기본 표면은 이방성 반사의 특성을 갖고 있다. 그림 10의 (a)는 단순 법선 매핑인 식 (2)를 적용한 결과로 그림의 동그란 돌기가 모두 법선 매핑을 통해 생성한 것이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 돌기들에서는 표면의 이방성 특성이 거의 사라졌음을 알 수 있다. 더구나 그림 6의 (b)에서 확인할 수 있었던 것처럼 법선의 섭동이 생기면 반사의 특성이 독특한 모양으로 왜곡되어 그림 10 (a)의 좌측 하단에 나타나는 것처럼 정상적이지 않은 모양의 정반사 특성이 나타나기도 한다. 그림 10의 (b)는 MDF를 변형하는 식 (5)를 적용하여 얻은 결과이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 법선 섭동을 통해 생성된 돌기들 역시 기본 표면이 갖고 있던 이방성 반사 특성을 잘 보존하고 있다.



(a) 단순 법선 맵 결과 (b) MDF 변형 적용 결과  
[그림 10] 제안된 기법과 단순 법선 맵의 반사 비교



(a) 단순 법선 맵 표면에서의 산란

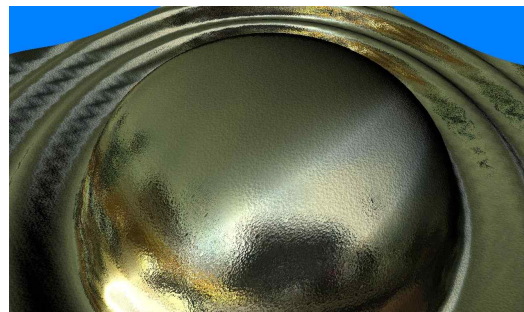


(b) MDF가 변형된 표면에서의 산란  
[그림 11] 흠집에 의한 산란 효과 재현 능력 비교

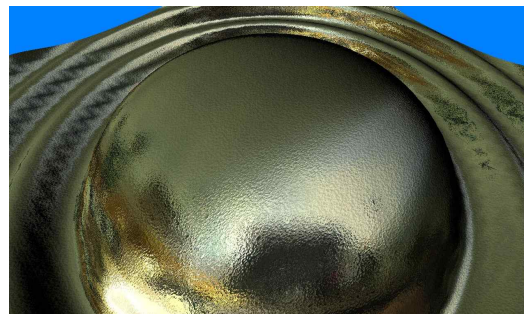
그림 11은 법선 맵으로 표현된 흠집이 표면에 적용되었을 때, 표면에서 나타나는 빛의 산란 효과를 비교하고 있다. 그림 11의 (a)는 단순한 법선 맵을 적용했을 때에 나타나는 빛의 산란 효과이며, (b)는 본 논문의 MDF 변형 기법을 적용했을 때에 얻을 수 있는 결과이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 단순 법선 맵에서는 법선 맵이

적용되기 이전에 표면이 갖던 반사 특성이 크게 변경되지 않는다. 그러나 그림 11의 (b)에서 확인할 수 있듯이 MDF 변형이 적용되었을 경우에는 더욱 사실적인 산란 효과가 나타남을 알 수 있다.

그림 12는 환경 맵과 함께 적용했을 때의 결과를 보이고 있다. 그림 12의 (a)는 환경 맵과 법선 맵을 적용한 결과이며, (b)는 MDF 변형이 추가적으로 적용된 결과이다. 그림 12의 비교에서도 그림 11과 동일한 결과를 얻을 수 있다. 법선 맵을 통해 환경 맵에 사용된 텍스처를 왜곡하여 적용해도 MDF 변형에서 나타나는 산란 효과를 얻을 수 없는 것이다.



(a) 단순 법선 맵과 환경 맵 표면에 흠집 적용

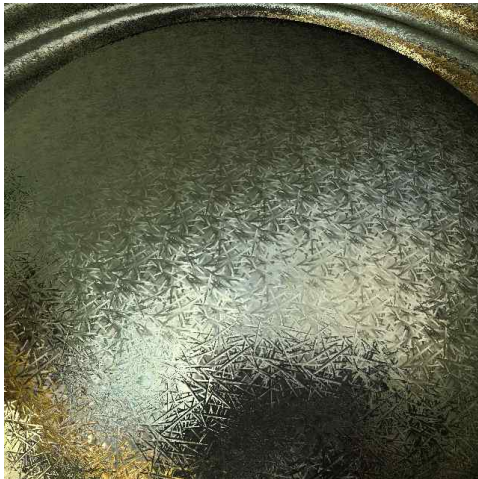


(b) MDF 변형이 추가로 적용된 표면  
[그림 12] 환경 맵이 적용된 표면에서의 MDF 효과

그림 13은 단순 법선 맵과 제안된 기법의 반사 특성 차이를 근접하여 관찰 비교한 결과이다. 그림 13의 (a)는 단순 법선 맵이 적용된 표면을 근접 렌더링한 것이며, (b)는 MDF 변형이 적용된 표면이다. 이때 적용된 흠집 텍스처는 동일한 법선 섭동을 가지고 있다. 그림 13의 (a)에 나타난 표면



의 정반사 영역의 위쪽 부분에서 확인할 수 있는 바와 같이, 단순 법선 매핑에서는 흠집에 의해 빛이 흩어지는 특성을 잘 표현하지 못하고 있다. 그림 6의 (b)에서 볼 수 있는 바와 같이 식 (2)를 삽입된 법선에 적용할 경우, 삽입되는 방향에 따라 반사 특성이 크게 달라지기 때문이다. 이에 비해 그림 13의 (b)는 MDF 변형을 같이 적용한 결과로서 해당 부분에서도 자연스러운 반사를 재현하고 있다.



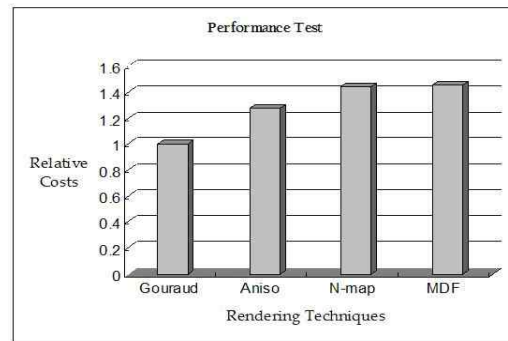
(a) 단순 법선 매핑만 적용된 표면의 근접 렌더링



(b) MDF 변형이 적용된 표면의 근접 렌더링

[그림 13] 제안된 기법과 단순 법선 매핑의 근접 비교

그림 14는 제안된 기법의 계산 성능을 분석한 결과이다. 이 분석에서는 OpenGL의 기본 렌더링 방식인 구로(Gouraud) 셰이딩의 계산 비용을 기준치 1로 설정하고 비교하였다. 비교의 대상이 된 렌더링 기법은 구로 셰이딩, 이방성 반사 기법, 법선 매핑, 제안된 MDF 변형 기법의 네 가지 종류이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 제안된 기법은 구로 셰이딩에 비해 1.46배의 계산 비용이 소요된다. 이 정도의 계산 비용은 제안된 기법이 실시간 환경에서도 매우 잘 동작함을 보이고 있다. 그림 14의 아래에 있는 표에 이 내용이 정리되어 있으며, FPS로 표시된 행은 3.2GHz intel Core i3 CPU와 4GB DDR3 메인 메모리를 가진 iMac에서 ATI Radeon HD 5670 GPU로 렌더링 했을 때 얻은 초당 프레임 수를 보이고 있다.



Tech	Gouraud	Aniso	N-Map	MDF
Cost	1	1.28	1.44	1.46
FPS	1004	968	647	642

[그림 14] 제안된 기법의 렌더링 성능

## 4. 결 론

본 논문에서는 실시간 응용 프로그램에서 사실적인 금속 재질을 렌더링하기 위해 법선 매핑의 문제점을 개선한 효과적인 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 금속면의 미세한 흠집을 표현하기 위해 법선 벡터를 삽입하는 방법을 사용하였다.

본 논문에서는 이방성 반사 특성을 갖는 미세면

모델에서 일반적인 법선 섭동 기법이 정확한 반사 특성을 재현하지 못함을 보였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 기법은 미세면 분포 함수, 즉 MDF를 변형하는 기법을 사용하였다.

실험을 통해 제안된 기법이 단순 법선 매핑에 비해 우수한 렌더링 품질을 제공함을 확인할 수 있었으며, 계산에 요구되는 비용도 크지 않음을 알 수 있었다. 제안된 기법은 쉽게 GPU 프로그램으로 구현되며, 실시간 환경에서 동작한다. 본 논문의 기법을 통해 게임이나 가상현실 등의 실시간 환경에서 매우 높은 수준의 사실성을 가진 금속 객체를 활용할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of Optical Society of America*, 57(9), 1967.
- [2] Blinn J. and Newell M. Texture and reflection in computer generated images. *Communication of ACM*, 19(10):542 - 547, 1976.
- [3] Blinn J. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *Proceedings of the 4th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 192-198, 1977.
- [4] R. L. Cook and K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *Computer Graphics (ACMSiggraph '81 Conference Proceedings)*, 15(3):307 - 316, 1981.
- [5] M. Poulin and A. Fournier. A model for anisotropic reflection. *Computer Graphics (ACMSiggraph '90 Conference Proceedings)*, 23(4):273 - 282, 1990.
- [6] G. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. *Computer Graphics (ACMSiggraph '92 Conference Proceedings)*, 26(2):265 - 272, 1992.
- [7] C. Schlick. A customizable reflectance model for everyday rendering. In *Proceedings of Fourth Eurographics Workshop on Rendering*, pages 73-84, 1993.
- [8] M. Ashikhmin, S. Premoze, and P. Shirley. A microfacet-based brdf generator. *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 65 - 74, 2000.
- [9] M. Ashikhmin and P. Shirley. An anisotropic phong brdf model. *Journal of Graphics Tools*, 5(2):25 - 32, 2002.
- [10] J. Wang, P. Ren, M. Gong, J. Snyder and B. Guo. All-frequency rendering of dynamic, spatially-varying reflectance. In *Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2009*, pages 1-10, 2009.
- [11] H. Rushmeier, G. Taubin, and A. Guezic. Applying shape from lighting variation to bump map capture. In *Rendering Techniques '97 (Proceedings of Eurographics Rendering Workshop)*, pages 35 - 44, June 1997.
- [12] W. Heidrich and H.-P. Seidel. Realistic, hardware-accelerated shading and lighting. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive techniques*, pages 171-178, 1999.
- [13] M. Pharr and G. Humphreys. *Physically-based Rendering*. Elsevier (Morgan Kaufman Publishers), San Francisco, 2004.
- [14] V. Krishnamurthy and M. Levoy. Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes. In *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 313-324, 1996.
- [15] M. Doggett and J. Hirche. Adaptive view dependent tessellation of displacement maps. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware*, pages 59-66, 2000.
- [16] A. Lee, H. Moreton and H. Hoppe. Displaced subdivision surfaces. In *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 85-94, 2000.



강영민 (Young-Min Kang)

1996년 부산대학교 전산학과 이학사  
 1999년 부산대학교 전산학과 이학석사  
 2003년 부산대학교 전산학과 이학박사  
 2003년~2005년 한국전자통신연구원  
 2005년~현재 동명대학교 게임공학과 조교수

관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 게임 프로그래밍