

실감재질(realistic material) 모델링 기술의 소개

글_ 이관형 | 광주과학기술원 기계공학과 | khlee@gist.ac.kr

1. 서론

21세기 제조환경에서 제품의 품질과 기능이 비슷해지면서 외관 디자인이 고객의 선택을 좌우하는 중요한 요소가 되었다. 휴대용단말기와 같은 전자제품의 경우 다양한 소비자의 요구조건을 만족시키기 위해서 해마다 수많은 제품모델이 개발되고 있으며 그 외관 및 재질 또한 한층 고급화되는 경향을 보이고 있다. 특히 지금까지는 대부분 플라스틱이나 금속재질이 주가 되어 왔으나 그 이외에 대리석, 옥, 보석류 등, 부가가치를 높이고 보다 고급스러운 느낌을 주기 위한 새로운 고급재질도 시도되고 있다. 가전제품의 경우도 지금까지의 천연일물적인 색과 재질을 떠나서 보다 다양한 형태와 재질을 사용하고 있어서 더 이상 백색가전이라고 부를 수 없는 상황이 되었다. 이렇게 제품외관의 미적인 품질이 제품의 성공여부에 중요한 요인이 됨에 따라, 실제 재질을 디자인 단계에서 표현할 수 있는 실감재질 모델링기술의 필요성이 부각되고 있다.

실사적인 재질표현을 위해서는 제품모델의 형상(geometry), 광원을 포함한 조명정보, 그리고 재질의 반사특성을 모두 고려해야 한다. 실감재질을 나타내는 재질의 반사도는 재질샘플의 자세(orientation)에 따라 빛의 입사각과 반사각, 바라보는 시점의 매개변수로 표현되는 함수로 정의한다. 이론적으로는 빛 입자의

재질표면 상의 위치 (x, y), 빛의 방향 (θ, ϕ), 시간 (t), 파장 (λ)을 입사시와 반사시에 따라 각각 여섯 개의 파라미터로 하여 12차원 함수로 표현한다. 여기서 정의된 12차원의 함수는 재질 및 조명등에 관련된 여러 가지 가정을 하여 함수의 차원을 줄일 수 있다. 금속과 같은 불투명한 재질은 4차원 함수인 BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)로 표현할 수 있으며, 대리석과 같은 반투명한 재질은 내부 산란까지 고려해야 하므로 8차원 함수인 BSSRDF(Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function)를 사용한다. 그림 1은 반사특성이 다른 몇 가지 불투명 재질들의 BRDF를 측정하여 CAD모델에 적용한 예를 보여주고 있다.

재질은 그 성질에 따라서 넓고 균일하게 퍼져서 반사하거나(diffuse reflection), 거울처럼 반사하거나(specular reflection), 광택있게 반사하는(glossy reflection) 등 각기 다른 반사특성을 보인다. 덧붙여 재질 내에 안료입자(pigment particle)가 있는 경우, 재질이 투명하거나 반투명한 경우, 재질이 두 개 이상의 층으로 되어 있는 경우 모두 다른 반사 특성을 보인다. 또한 재질면의 상태나(거칠기, 등방성 등) 표면 구조에 따라서도 다른 반사 특성을 보인다. 따라서 이렇게 무수히 다른 재질특성을 사실감 있게 나타내려면 실제 재질을 측정하여 사용하는 것이 가장 실사에 가까운 효

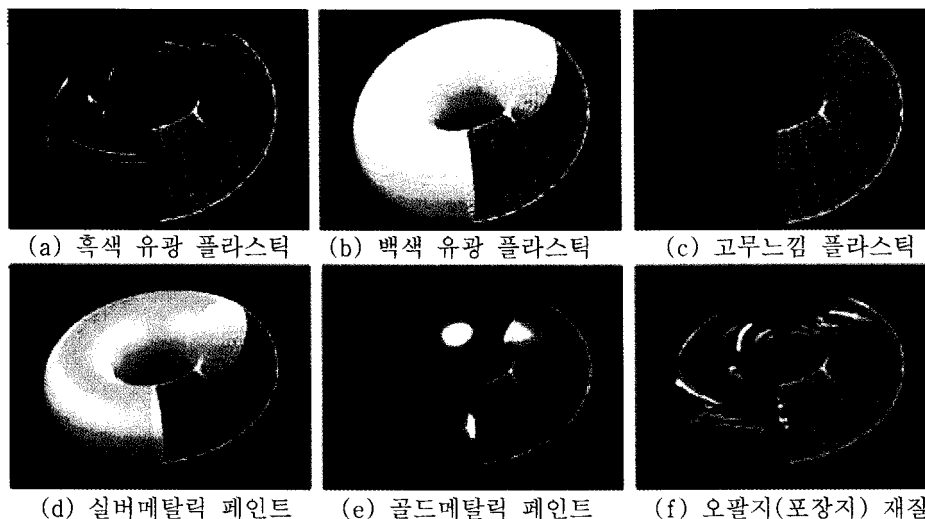


그림 1. 반사특성이 각기 다른 재질을 원환(torus) CAD모델에 적용한 예

과를 낼 수 있다. 본 원고에서는 실제 재질의 측정과 측정된 데이터를 이용한 모델링방법을 중심으로 실감 재질모델링 기술의 내용과 동향을 소개한다.

2. 재질반사도 측정

실감재질 측정 장치는 광학분야에서 제안된 고니오 반사측정계(gonioreflectometer)를 이용하는 1세대 장치로부터 발전하여 왔는데, 광원, 재질샘플, 광량계로 구성되어 재질의 반사도(BRDF)를 측정한다. BRDF는 입사되는 빛의 방향과 반사되는 빛의 방향에 따른 재질 표면에서의 조사도(irradiance)와 복사도(radiance)의 비율을 나타내는 함수이고, 입사되는 빛의 산란이 재질 표면 위에서 발생하는 불투명한 재질에 적합하다.

그림 2에서 1세대 시스템으로 분류한 초기의 BRDF 측정시스템은 평면의 재질샘플을 놓고, 광량계로는 조도계를 사용했기 때문에 한 번에 재질면의 한 점에서의 반사도만 측정할 수 있었다. 이후, 대부분의 측정 시스템은 저가의 널리 보급된 디지털카메라를 광량계로 사용하면서 한 점이 아닌 영역을 측정하여 텍스처

의 반사특성(BTF)까지 표현하게 되었다. 그러나 여전히 평면 재질샘플을 사용하기 때문에 모든 방향각의 데이터를 얻기 위해서는 수십 시간의 과도한 측정 시간을 요구하며, 대용량의 측정데이터를 생성한다.

2세대 시스템에서는 측정시스템을 단순화하고 여러 방향의 반사된 빛을 직접 촬영하는 굴곡 샘플을 이용하는 장치들이 제안되었다. 예를 들어 Marschner와 Matusik은 구형 재질샘플의 주위를 회전하는 광원과 고정된 카메라를 이용하여 BRDF를 측정하였다. 이러한 측정방식은 구형 재질샘플을 사용함으로써 측정시간을 크게 줄이는 장점이 있다. 그러나 균일한 표면상태의 구형 재질 샘플을 가공하기 힘든 점과 간섭이 없고 균일한 특성을 갖는 광원을 개발해야 하는 어려움이 있다.

3세대 시스템에서는 구형 재질샘플을 사용하는 대신 여러 대의 디지털카메라와 광원을 사용하여 측정시간을 현저히 줄일 수 있는 장치들이 개발되었다. 하지만 다수의 디지털 카메라들 간의 기하보정, 컬러보정, 그리고 광원특성 보정 등의 복잡한 작업이 요구된다.

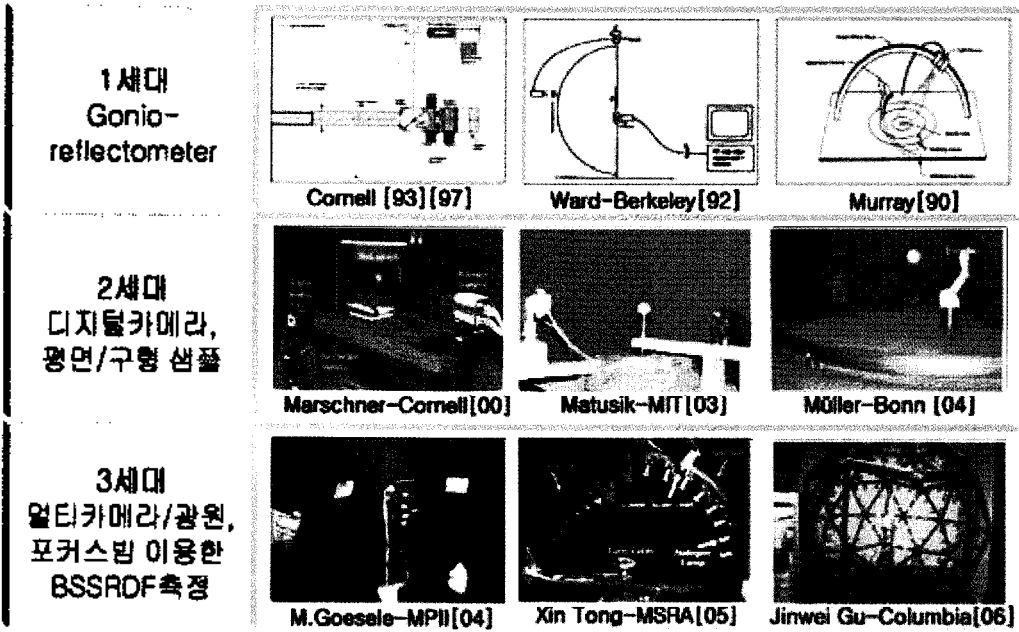
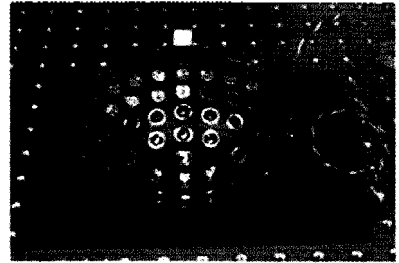


그림 2. 재질 측정시스템의 발전

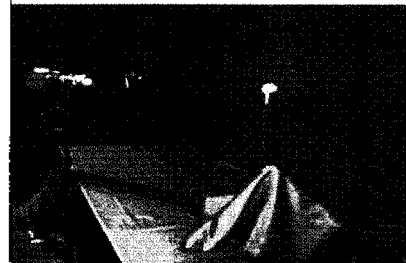
최근에는 마이크로소프트 아시아(MSRA) 에서 수광 소자와 발광 소자를 동시에 갖는 LED (light emitting diode) 를 이용하여, 빠르게 대상 재질의 BRDF 를 측정할 수 있는 돔(dome) 타입의 측정 시스템을 개발하였다(그림 3). 하지만, LED의 갯수에 따라 측정 샘플링률(sampling ratio) 이 정해지므로, 고해상도 시스템으로 구현하기에는 복잡하고 동기화 문제 등이 발생한다.

광주과학기술원 지능 설계 및 그래픽스 연구실 (IDEG) 에서는 한 번에 넓은 밝기 영역을 찍을 수 있는 HDR (High dynamic range) 카메라를 이용하여, 수분 이내에 등방성(isotropic) 재질의 BRDF를 고해상도로 측정 할 수 있는 시스템을 개발하였다(그림 3).

재질의 정확한 측정을 위해서는 구현하려는 재질의 종류와 특성에 따라 반사도를 측정하는 방법을 달리 해주어야 한다. 옥이나 대리석과 같이 반투명한 경우



Moshe - MSRA (08)



GIST RMS III (08)

그림 3. 재질 측정시스템의 최근 동향

는 빛의 반사도 뿐만 아니라 부과도와 내부산란 등을 고려해야 실질적인 결과를 얻는 것이 가능하다. 더 나아가서 섬유와 같은 재질은 미세한 표면형상구조들을 고려해 주어야 한다.

3. 재질함수 모델링

측정데이터 기반 재질모델링기술은 측정한 BRDF 데이터를 저장하거나 렌더링하는데 유용하도록 측정 데이터를 최적으로 대표할 수 있는 모델을 개발하거나 그 형태를 변환하는 기술이다. 일반적으로 재질 측정시스템을 통해 획득한 BRDF 데이터는 4차원의 데이터 형식을 지니고 있어서 한 개의 재질샘플을 저장하는 데에도 대략 수 십에서 수 백 Mega byte의 고용량을 필요로 하기 때문이다. 측정기반 재질모델링기술은 경험적 또는 물리학적으로 수립된 파라메트릭(parametric) 형태의 BRDF모델을 측정데이터에 피팅(fitting)하여 재질에 대응하는 모델 파라미터를 찾는 해석적(analytical) 모델링 방법과, 측정데이터를 저차원화하여 비파라메트릭(Non-parametric) 형태로 표현하는 데이터유도(data-driven) 방법으로 발전해 왔다.

해석적(analytical) 모델은 인간이 인지하는 재질 특성을 반영하는 함수를 기저함수로 사용하여 개발한 경험적 모델과 빛의 분체에 대한 반응을 물리학적 접근 방법으로 근사한 물리적 현상 기반 모델로 나눈다. 경험적 모델의 시초가 되는 Phong모델은 난반사(diffuse) 기저함수와 코사인 로브(lobe) 특성을 갖는 전반사(specular) 기저함수의 조합으로 이루어져 있으며 사용자가 파라미터를 직관적으로 결정하여 나타내고자 하는 재질의 특성을 표현한다. Phong모델을 시작으로 적은 연산량으로 유사한 효과를 낼 수 있도록 기존의 반구형 좌표계(Hemi-sphere coordinate)를 개선한 Blinn-Phong 모델, 기저함수들을 보다 일반적인 형태로 정리한 Lafortune모델 등으로 발전하였다. 그러나 이러한 경험적 모델들은 물리적인 이론을 바탕으로 하지 않고

직관적으로 선정된 기저함수들로 이루어져 있기 때문에 실제의 재질과는 상이하게 표현될 수 밖에 없다.

Torrance-Sparrow모델로 시작되는 물리적 기반 모델은 재질 표면의 극소형상(micro-geometry)이 재질 반사도에 미치는 영향을 고려하기 위하여 미세면 분포 함수(facet slope distribution function), 기하감쇠 계수(geometrical attenuation factor), 프레넬 항복(Fresnel term)등을 사용하여 보다 사실적인 재질 표현이 가능하도록 설계되었다. 미세면 분포 함수는 재질 표면에 위치한 극소형상의 평균 거칠기에 대한 반사도를 나타내고, 기하감쇠 계수는 극소형상 때문에 빛의 입사각과 바라보는 시점에 따라 상쇄되는 반사도 비율을 나타내며, 프레넬 항복은 빛의 입사각에 따라 변화되는 재질의 반사도 특성을 나타낸다. 그러나 Cook-Torrance나 Ashikhmin모델과 같은 물리 현상 기반 모델이 경험적 모델보다 더 사실적인 결과를 보여 줄 수 있다 하더라도, 근본적으로 소수의 기저함수를 사용하므로 메탈릭 페인트와 같은 비균질 특성의 재질을 표현하는 데에는 어려움이 있다. 또한 복잡한 형상을 갖는 재질데이터를 이러한 기존의 BRDF모델에 적용하여 최적의 파라미터를 결정하고자 할 때, 비선형 최적화 과정에서 해가 수렴하여도 그 결과가 실제 재질감과 상이하게 나타나는 문제점이 발생할 수 있다.

한편 측정 데이터 기반의 비파라메트릭(Non-parametric) 표현 방식은 해석적 모델 기반방법에 비해 복잡한 재질을 보다 사실적으로 표현 가능하다. 하지만 앞서 설명한 것처럼 각 재질의 정확한 반사 데이터를 얻기 위해서는 많은 시간과 비용이 필요 한데, 그 측정 데이터 사이즈 또한 문제가 될 수 있다. 이런 데이터 사이즈 문제를 해결하기 위해서 많은 연구자들은 SVD, PCA, NMF 같은 행렬 분해(matrix decomposition) 기법을 고차원의 측정 데이터에 적용하였다. 이는 원래의 데이터를 다수의 저 차원의 데이터로 근사화하는 것으로 데이터의 정확성을 유지한 채, 데이터

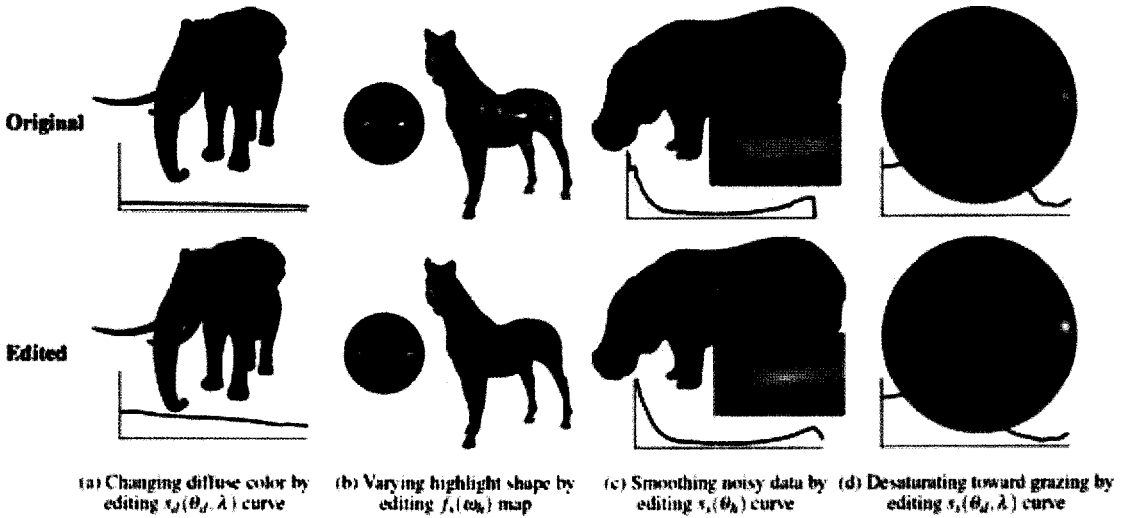


그림 4. 측정 재질의 반사 특성 수정 (출처: Lawrence2006[1])

$$\begin{aligned}
 \blacksquare &= \alpha_1 \blacksquare + \alpha_2 \blacksquare + \alpha_3 \blacksquare + \alpha_4 \blacksquare \\
 &+ \alpha_5 \blacksquare + \alpha_6 \blacksquare + \dots + \alpha_N \blacksquare
 \end{aligned}$$

그림 5. 측정 재질의 선형 조합을 통한 새로운 재질의 생성(출처: Matusik2003[2])

를 축소 할 수 있는 장점이 있다.

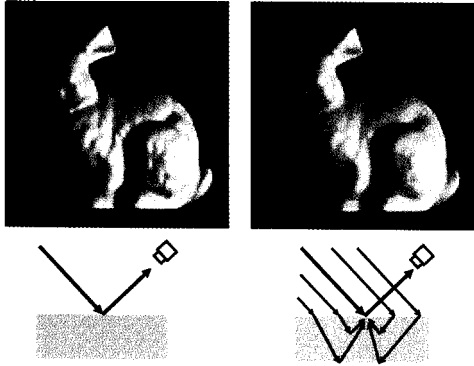
대표적으로 Lawrence[1]는 NMF 알고리즘을 이용하여 트리 구성의 새로운 재질 데이터 표현법을 제시하였다. 이 방법은 측정 재질을 적은 수의 데이터로 표현 가능할 뿐만 아니라 트리(tree)를 구성하고 있는 저장원 데이터를 수정하는 방식을 통해서 다양한 재질 반사 특성의 디자인이 가능하다 (그림 4).

측정 데이터에 기반한 재질 디자인 기법에는 다양한 반사 특성을 지닌 측정 데이터를 이용하여 기존 측정 재질과 다른 특성을 지닌 새 데이터를 생성하는 방

법도 있다[2]. 이 방법은 메탈, 페인트, 섬유와 같은 다른 104가지 재질의 BRDF를 기저 데이터로 하여, 그림 5에서 보는 것처럼 재질의 조합을 통해 새로운 재질을 만든다.

4. 내부산란 재질

앞서 언급한 BRDF는 불투명 재질의 반사도를 표현하고 측정하는데 널리 사용된다. 반면 고무, 피부, 우유 등과 같은 반투명한 재질들은 불투명한 재질과는 다르게 입사된 빛이 어느 정도의 거리를 투과한 후



(a) 불투명재질(BRDF) (b)반투명재질(BSSRDF)

그림 6. 불투명 재질과 반투명 재질의 렌더링 예외 빛 산란 모델

다시 방출하게 된다(그림 6).

이러한 반투명한 재질의 반사도를 표현하기 위해서는 또 다른 반사도 함수가 필요하다. BSSRDF(Bi-directional Surface Scattering Reflectance Distribution Function)는 빛의 입사 방향과 반사 방향을 고려한 BRDF에 더하여 빛의 입사 위치와 반사 위치를 추가적으로 고려한 반사도 함수이다. 반투명한 재질의 반사도를 표현하기 위한 BSSRDF의 값을 사실적으로 구하기 위해서는 디퓨즈 반사 효과를 얼마만큼 정확하게 표현할 수 있는가가 관건이다. 반투명한 재질의 경우 불투명한 재질에 비하여 디퓨즈 반사가 전체 반사도에 미치는 영향이 스펙클러 반사(specular) 보다 월등하기

때문이다. 통상적인 시뮬레이션 방법이 그렇듯 디퓨즈 반사를 추정하는데 있어서도 정확한 결과를 가져다 주는 방법일수록 더욱 많은 계산 시간을 필요로 한다.

아래 표 1은 디퓨즈 효과를 기술하는 여러 방법들의 장단점을 각각 기술한 것이다. 어떠한 방법을 사용할지는 사용자의 의도에 달려있으나 소요 시간 대비 비교적 정확한 예측을 해주는 쌍극자 근사 기법을 가장 흔히 사용한다.

반투명 재질의 반사도를 추정하는데 있어 또 하나의 난제는 다중 재질로 이루어진 반투명 재질의 반사도를 예측하는 것이다. 반투명한 상위 재질을 갖는 재질은 입사된 빛의 일부가 다시 하위 재질과 반응하여 전체 반사도에 영향을 주게 되므로 하위 재질의 반사도도 함께 고려해주어야만 한다. 이러한 경우에는 앞서 말한 단일 재질과 달리 상위 재질의 반사도 뿐만 아니라 상위 재질의 투과도와 하위 재질의 반사도까지도 동시에 고려해주어야만 한다. 그러므로 이러한 다중 재질은 상위 재질과 하위 재질의 반사도를 어떻게 조합하여 전체 반사도를 표현할 수 있는지도 함께 연구되어야만 한다. 쿠벨카-몽크(Kubelka-Munk) 이론은 재질의 겹수를 가리지 않고 다중 재질의 반사도 조합 방법을 제공한다. 요컨대 다중 반투명 재질에는 반사도를 예측하기 위해서는 우선 다극자 근사 기법을 사용하여 상위 재질의 반사도와 투과도를 구한 후, 쌍극

표 1. 다양한 디퓨즈 효과 기술방법과 장단점

디퓨즈 효과 기술방법(반투명)	장점	단점
몬테카를로 방법(Monte Carlo)	알려진 방법 중 가장 정확한 해석 방법	확률론적인 접근방법이므로 많게는 수시간의 계산 시간을 요함
쌍극자 근사 기법 (Dipole approximation)	소요 시간 대비 비교적 정확한 예측이 가능	입사부 주변의 반사도 예측에는 부정확함
다극자 근사 기법 (Multi-pole approximation)	반사도, 투과도까지 동시에 기술	쌍극자 기법에 비하여 복잡함
쿠벨카-몽크 이론 (Kubelka-Munk theory)	가장 단순한 이론	디퓨즈 조명 조건하에서만 사용되며 상대적으로 정확도가 떨어짐

자 근사 기법으로 하위 재질의 반사도를 구한 다음 이들을 쿠벨카-몽크 이론을 활용하여 전체 반사도를 예측하게 된다.

앞서 언급하였듯이 재질의 디퓨즈 반사값을 추정하는 다양한 이론들이 존재하나 이들은 모두 산란도(scattering) 와 흡수도(absorption) 파라미터를 필요로 한다. 그러므로 측정을 통하여 이러한 파라미터들을 구하는 것이 광학, 의료공학, 섬유공학 등의 분야에서는 중요한 문제이다. 다양한 측정 방법들이 존재할 수 있으나 집적된 광을 재질 표면에 조사한 후 어떠한 프로파일로 주변에 빛이 퍼지는 지를 측정하여 파라미터를 추정하는 것이 가장 일반적인 방법이다.

5. 결론 및 논의

본 원고에서는 실제 재질의 반사도(BRDF) 측정과 측정된 데이터를 기반한 모델링을 중심으로 실감재질

모델링 기술의 동향을 소개하였다. 재질 반사도 측정 장비들은 하나의 재질 샘플당 수십 시간이 소요되는 1세대 장치들로부터 수분 내에 측정 가능한 최근의 장비들까지 비약적으로 발전해 왔다. 하지만 측정시간을 단축시키기 위해 사용하는 메커니즘(mechanism) - 옵틱(optic), 굴곡샘플, HDR 카메라 등 - 은 구조적으로 측정오차의 가능성을 동반하므로 정밀도(accuracy) 향상에 관한 연구가 요구된다. 또한 측정 BRDF에 기반한 재질 반사도 모델링은 파라메트릭 형태의 해석적(analytical) 모델에서 비파라메트릭 형태의 데이터-유도형(data-driven) 모델로 발전해 왔다. 또한 본 원고에서는 불투명한 재질(BRDF) 뿐만 아니라 대리석, 옥, 사람피부 등 내부산란이 발생하는 재질(BSSRDF)에 대한 기초 연구도 상당히 진행되었음을 소개하였다.

최근 실감재질모델링기술은 실시간 렌더링이 가능하도록 많은 연구가 진행되고 있으며 상용화된 제품

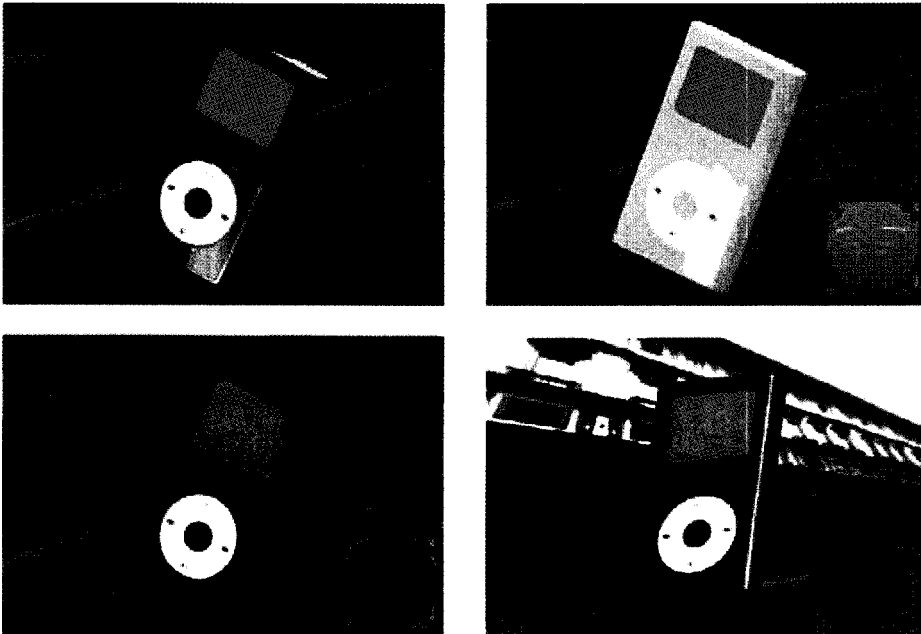


그림 7. 측정을 기반한 실감재질을 Apple 사의 Mp3 플레이어인 iPod에 적용한 예

들도 있는데, 자동차산업을 주목표로 하여 몇 개의 소프트웨어가 개발되었다. 미국 Autodesk 社의 Image Studio3.0와 Opus Realizer, 독일 Realtime Technology 社의 DeltaGen, 그리고 독일 ConWeb 社의 LightMAGIC 등인데, 이들 소프트웨어는 자동차산업에 국한된 응용분야를 가지고 있어서 아직 전자제품 등 다른 산업제품에 필요한 다양한 고급 실감재질을 표현하지 못하는 한계를 가지고 있다. 렌더링 소프트웨어가 산업에 잘 활용되기 위해서는 수많은 재질의 측정작업이

필요하고, 측정된 재질의 분석과 모델링을 통한 다양한 재질 데이터베이스가 지원되어야 하며, 실시간 렌더링기술이 향상되어야 한다.

참고문헌

1. Jason Lawrence et al., "Inverse Shade Trees for Non-Parametric Material Representation and Editing," Proc. ACM SIGGRAGH2006, 25(3)
2. Wojciech Matusik et al., "A Data-Driven Reflectance Model," Proc. ACM SIGGRAGH2003, 22(3)