



The Comprehensive PBR Guide by Allegorithmic - vol. 1

Light and Matter : The theory of Physically-Based Rendering and Shading

Cover by Gaëtan Lassagne, written by Wes McDermott



allegorithmic



빛과 재질

물리기반 렌더링&쉐이딩에 대한 이론

빛은 파장과 입자의 현상을 같이 보이기 때문에 복잡한 현상입니다.

결과적으로 여러 모델들이 빛의 행동을 설명하려고 만들어져 왔습니다.

텍스처 아티스트로서, 우리는 빛과 재질의 상호작용을 설명해 주는 **Light Ray Model**에 관심이 있습니다.

어떻게 광선이 표면재질하고 반응하는지 이해하는 것은 우리에게 중요합니다. 왜냐하면 우리의 일은 표면을 묘사하는 텍스처들을 만드는 것이기 때문입니다. 우리는 우리가 만드는 가상 세계에서 텍스처와 재질들이 어떻게 반응하는지 살펴보고, 더 나아가 어떻게 빛이 행동하고 텍스처가 어떻게 보일지도 이해할 것입니다.

이 가이드에서, 우리는 물리 기반 렌더링의 모델이 되는 물리학 뒤의 이론에 대해 설명합니다.

우리는 광선과 **PBR**에서 중요한 요소들을 정의하면서 시작하겠습니다.

광선(Light Rays)

광선모델은 광선은 공기와 같은 동종의 투명한 매질에서 직선궤도를 가진다고 주장합니다.

광선모델은 또한 광선이 불투명한 오브젝트와 충돌하거나 공기에서 물로 가는 것처럼 다른 매질로 갈 때에 예측가능한 움직임을 가진다고 말합니다.

이것은 광선이 따라갈 출발점부터 결국 열과같은 다른 형태의 에너지로 변환하는 지점까지의 길을 시각화 하는걸 가능하게 해줍니다.

표면과 조우하는 광선을 **incident Ray**라고 부르고, **Incidence of Angle**이라고 부르는(입사각) **incident Ray**의 각도는 **figure 01**에 나타나 있습니다.

광선이 표면을 조우할 때, 두가지 일이 발생할 수 있습니다.

1. 광선은 표면에서 반사되서 떨어져 나와 다른 방향으로 향합니다. 이것은 입사각과 반사각이 같다는 반사의 법칙을 따릅니다.(반사되는 빛)
2. 광선은 하나의 매질에서 다른 매질을 직선의 궤적으로 통과합니다.(굴절되는 빛)

이러한 관점에서 우리는 광선은 반사와 굴절 2가지로 분리된다고 말할 수 있습니다.

표면에서 광선은 반사되거나 굴절됩니다. 그리고 이것은 결과적으로 다른 매질에 의해 흡수될 수도 있습니다. 그러나 흡수는 표면에서 일어나지 않습니다.

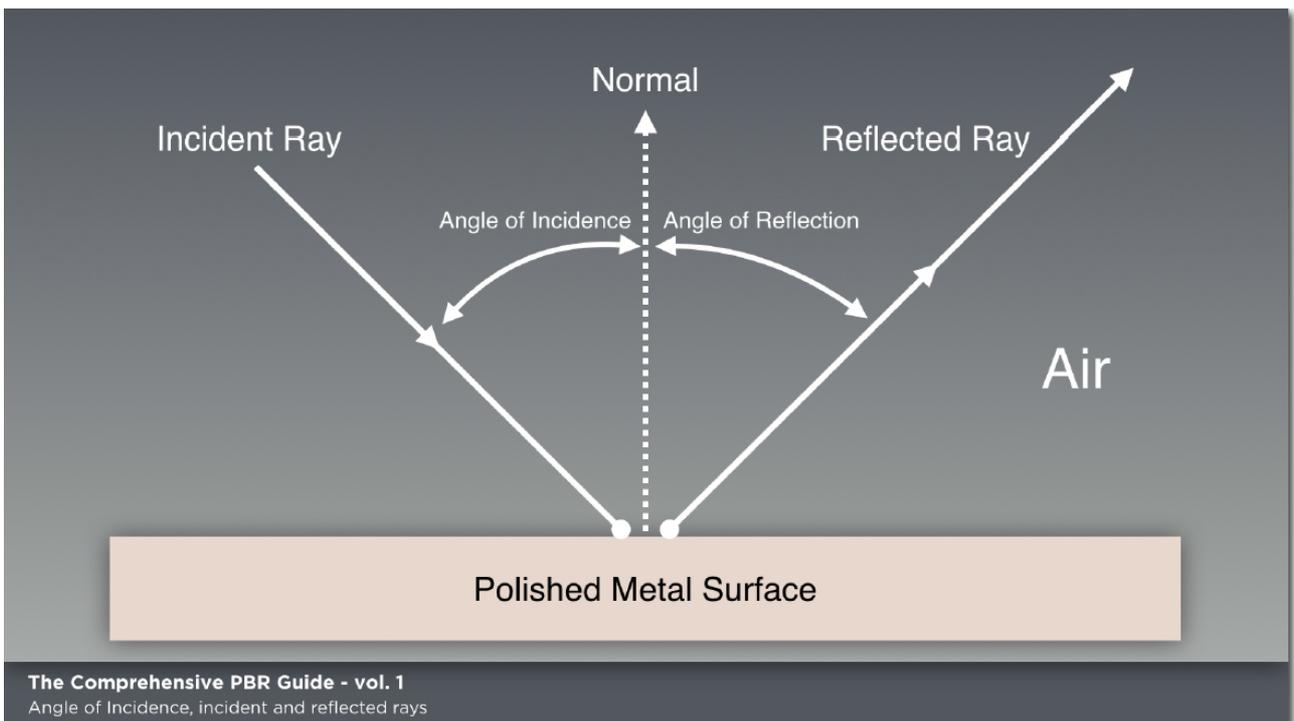


Figure 01

흡수와 확산 (투명과 반투명)

동질이 아닌 매질을 지나치거나 반투명한 재질을 지나갈 때 빛은 흡수되거나 확산됩니다.

1. 흡수의 경우 빛이 다른 형태의 에너지(거의 열)로 변환에 따라 빛의 강도가 줄어듭니다. 그리고 이것의 색상 또한 파장에 따라 흡수되는 양만큼 변하게 됩니다. 그러나 광선의 방향은 바뀌지 않습니다.
2. 확산의 경우 광선의 방향은 재질의 편차의 양에 따라서 랜덤하게 바뀝니다. 확산은 광선의 방향을 랜덤하게 바꾸지만 강도는 변하지 않습니다. 귀는 좋은 예제입니다. 귀는 얇아서(흡수가 적음) 당신은 귀의 뒷쪽 빛이 확산되어 나오는 것을 확인할 수 있습니다. 만약 확산이 없고 흡수가 낮다면, 광선은 유리와 같은 재질처럼 곧바로 통과할 수 있습니다. 예를 들면, 당신이 만약 엄청 깨끗한 수영장에 있다면 물속에서도 눈을 떠서 아주 잘 볼 수 있습니다. 그러나 물이 더럽다면 더러운 입자들이 빛을 확산시키고 그것들이 물을 더 불투명하게 만들 것입니다. 빛이 그러한 재질이나 매질에서 더 많이 움직일수록 이것은 더 확산되거나 흡수됩니다. 그렇기 때문에 물체의 두께는 빛이 확산되거나 흡수되는 데 있어서 큰 역할을 합니다. Thickness 맵은 figure 02에서 보이는 대로 셰이더에서 물체의 두꺼움을 표현하는데 쓰여집니다.



Figure 02

분산과 거울반사(Diffuse and Specular Reflection)

Specular Reflection은 우리가 광선색선에서 다루었던 표면에서 반사되는 빛입니다. 광선은 표면에서 반사되고 다른 방향으로 나아갑니다. 이것은 완전한 평면에서 입사각은 반사각과 같다는 반사의 법칙을 따릅니다. 그러나 거의 모든 재질은 불규칙 하고 반사되는 방향은 표면의 거침의 정도에 따라 랜덤합니다. 이것은 빛의 방향을 바꾸지만 강도는 그대로 남습니다. 더 거친 표면일수록 크고 어두운 하이라이트를 만듭니다. 부드러운 표면일수록 적절한 각도에서 보았을 때 밝거나 더 강하게 나옵니다. 즉, 스펙큘러가 집중적입니다. 그러나 돌다 빛의 총량은 figure03에서처럼 반사됩니다. **Diffuse reflection**은 굴절된 빛입니다. 광선은 매질에서 다른 매질로 갈 때 물체 안에서 여러번 확산됩니다. 그것은 figure04에서 보여지는 것처럼 첫번째로 빛이 겪은 지점에서 매질로부터 다시 오브젝트 바깥으로 원래 매질을 향해서 굴절 시킵니다.

Diffuse 재질들은 꽤 흡수력이 있습니다. 굴절된 빛이 **Diffuse** 재질안에서 오래 머무는 것은 완벽하게 흡수되기 위한 좋은 조건입니다. 이것은 빛이 이러한 재질에서 다시 밖으로 나온다면 아마도 입구에서부터 많이 움직인 것은 아니라는 뜻입니다. 그것이 입구와 출구점이 무시될 수 있는 이유입니다. 전통적인 **Diffuse** 반사를 표현하는데 쓰이는 램버트 모델은 계산에 표면의 거침정도를 고려하지 않습니다. 그러나 **Oren-Nayar** 같이 표면의 거침정도를 고려하는 **Diffuse** 반사 모델도 있습니다.

높은 분산과 낮은 흡수 모두를 가지는 재질들은 가끔씩 'participating media'나 'translucent material'로 언급될 때가 있습니다. 이러한 재질의 예는 연기, 우유, 피부, 옥, 대리석 등입니다. 위에 세가지(피부, 옥, 대리석) 재질을 렌더링 할 때에는 광선의 들어오는 점과 나가는 점의 차이가 무시되지 않는 subsurface scattering(SSS)의 추가적인 모델링을 통해서 가능합니다. 매우 다양하고 매우 낮은 확산과 흡수를 가진 매질(연기, 안개 등)을 정확하게 렌더링하려면 Monte Carlo simulation과 같은 더 비싼 방법들이 필요합니다.

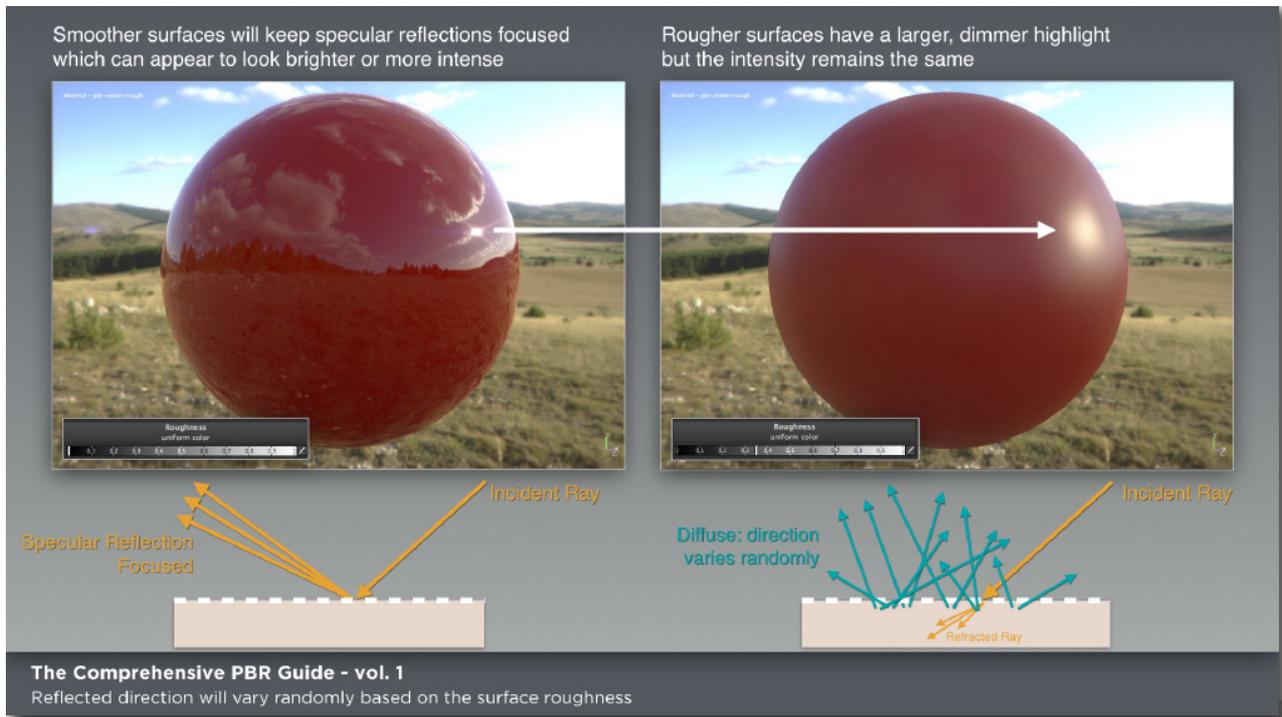


Figure 03

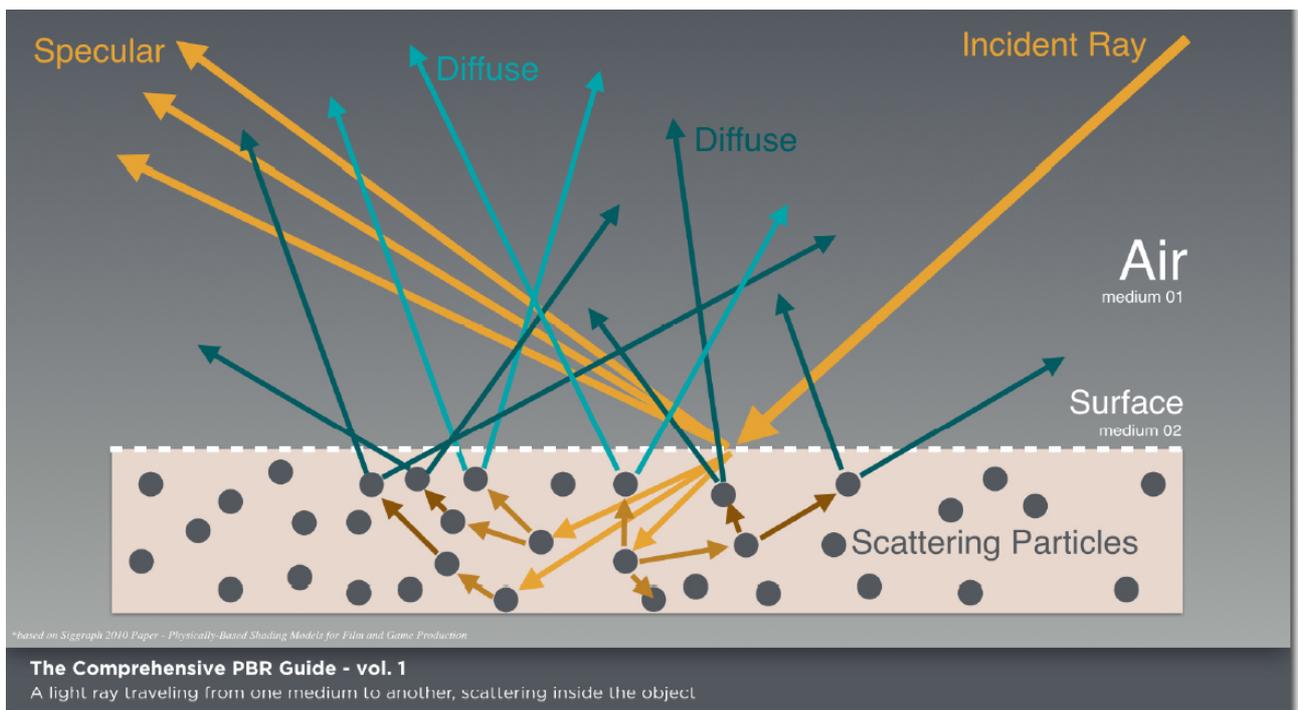


Figure 04

미세면 이론(Microfacet Theory)

이 이론에서 **diffuse**와 **specular reflection**은 모두 광선이 교차하는 표면의 불규칙함과 독립적입니다. 연습을 통해 **diffuse reflection**의 거친정도의 효과는 재질의 안쪽에서 일어나는 확산때문에 훨씬 더 적게 보인다고 하였습니다. 결과적으로 광선의 나가는 점은 입사방향과 표면의 거친정도에서 상당히 독립적입니다. 가장 흔히 쓰이는 모델인 램버트모델은 완전히 이러한 사실을 무시합니다. 이 문서에서 우리는 이러한 표면의 불규칙함을 **surface roughness**로 부르고 있습니다. 사실 이것은 **roughness**, **smoothness**, **glossiness**나 **micro-surface**와 같은 많은 이름으로 불립니다. 그러나 그것은 모두 표면의 같은 측면(**sub-texel geometric detail**)을 묘사하고 있습니다. 이러한 표면의 불규칙함은 당신이 사용하는 **roughness**나 **glossiness** 맵에서 만들어집니다. 물리기반의 **BRDF**는 표면은 **microfacet**라고 불리는 작은 플래너가 다양한 각도로 표면의 디테일을 표현하고 있다는 미세면 이론(**Microfacet Theory**)를 기반으로 하고 있습니다. 이런 작은 평면들은 **figure 05**에서 보이듯, 그 물체의 노말을 기반으로 빛을 반사하고 있습니다.

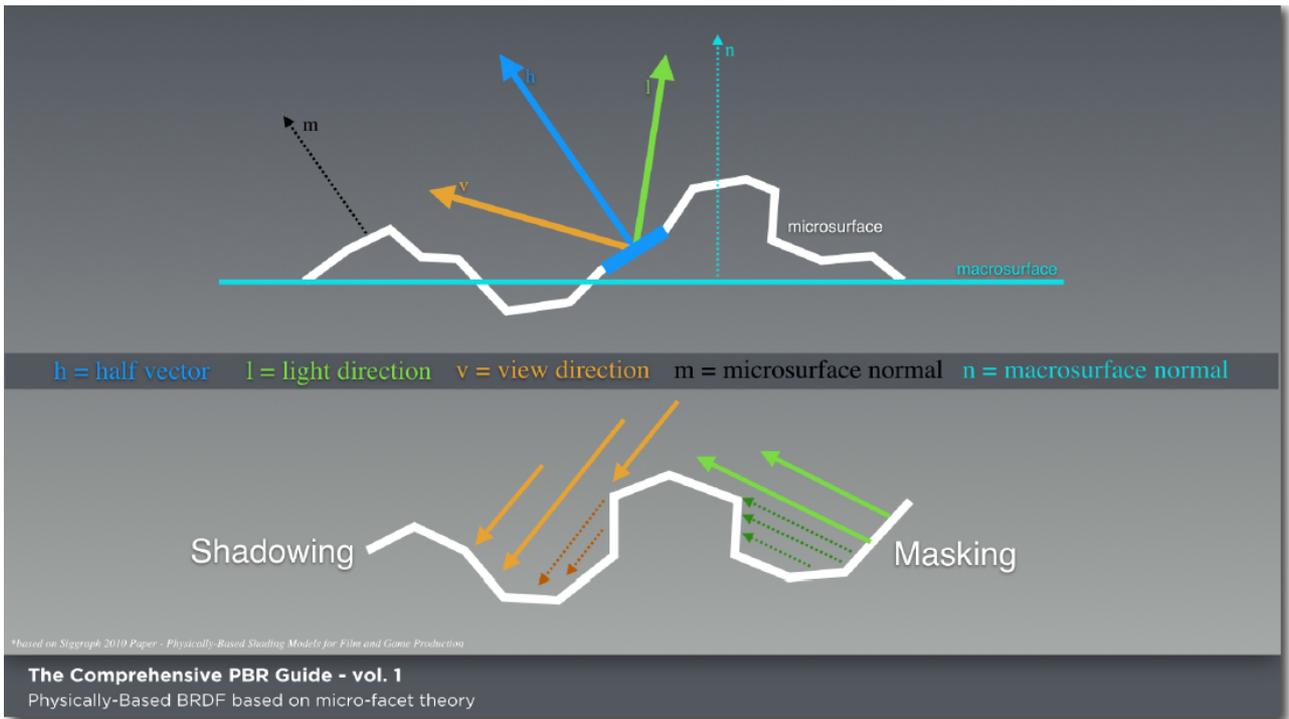


Figure 05

표면법선이 완벽하게 빛의 방향과 보는방향의 중간방향인 미세면들은 **visible light**를 반사시킬 것입니다. 그러나 **microsurface** 법선과 **half** 법선이 동등한 모든 미세면이 기여하는 것은 아닙니다. **Figure 05**에서 보이듯 몇몇은 **shadowing**(light direction)에 의해 가려지고 몇몇은 **masking**(view direction)됩니다.

미세한 수준의 표면 불규칙성은 **light diffusion**을 야기시킵니다. 예를들어 흐린 반사는 광선이 분산되서 그렇습니다. 광선들이 평행하게 반사되지 못해서 우리는 **figure 06**에서 보이듯 흐린 **specular reflection**을 얻게 됩니다.

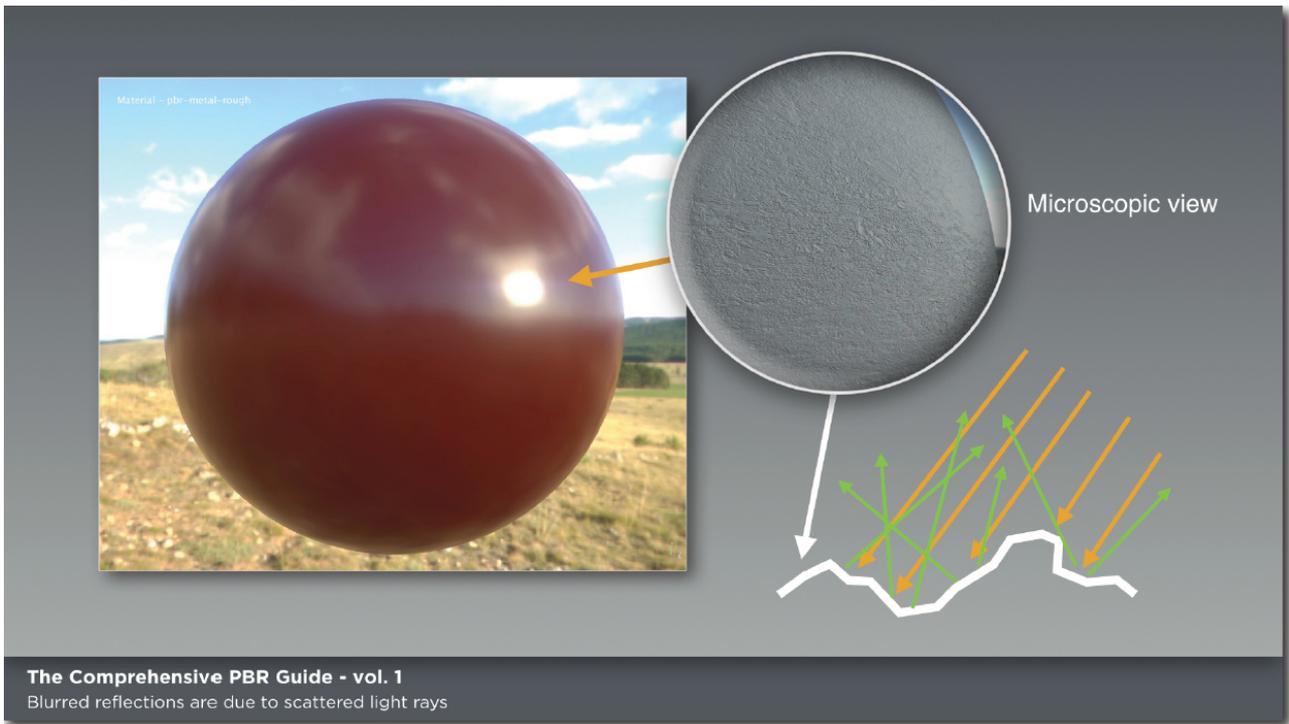


Figure 06

색(Color)

표면의 색상(우리가 보는 색)은 각각의 파장이 빛에서 부터 방출되기 때문에 그렇습니다. 어떤 광선은 흡수되고 어떤 광선은 반사되기 때문입니다. 남아있는 반사되는 파장이 우리가 색으로 보는 그것입니다. 예를들면 사과 표면은 거의 빨간색만 반사합니다. 빨간 파장만 사과 표면에서 분산되고 다른것들은 figure 07에서 보듯 흡수되기 때문입니다.

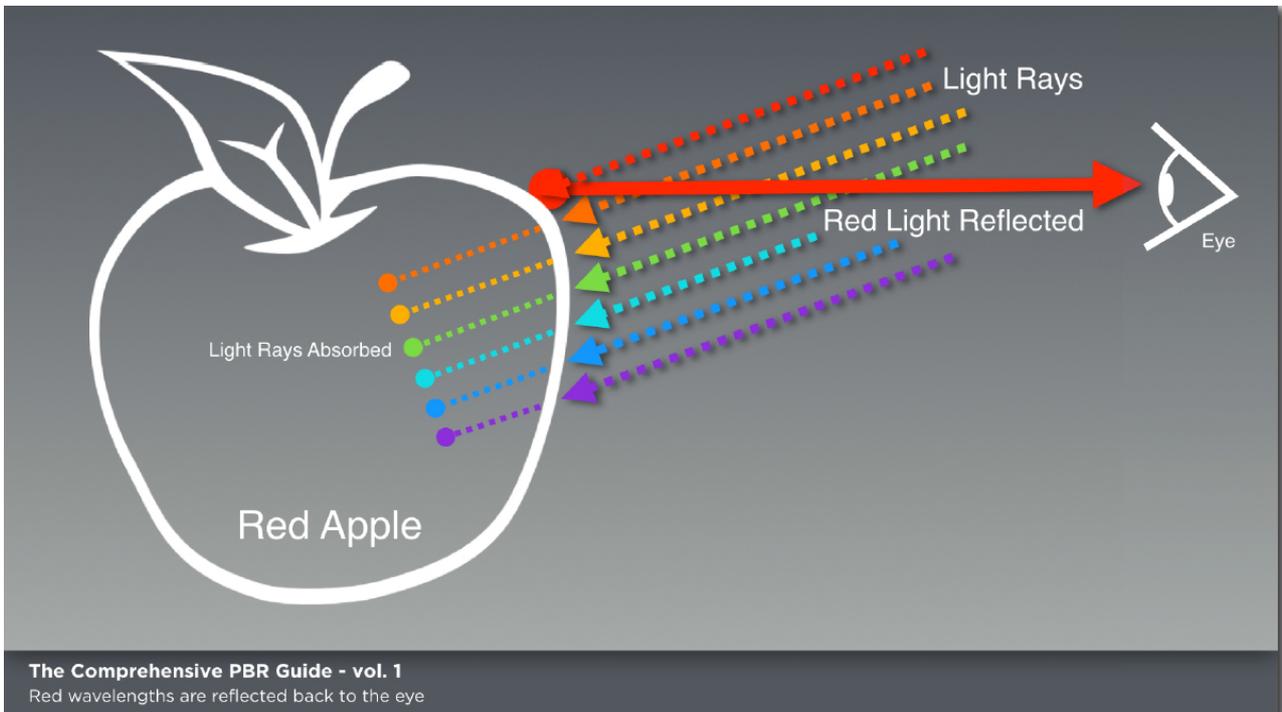


Figure 07

이것은 또한 빛의 색상과 같은 밝은 specular 하이라이트를 가집니다. 왜냐하면 사과껍질은 전기도체가 아니기 때문입니다.(전기가 흐르지 않는 물질이라는 뜻) Specular reflection은 거의 파장에서 독립적입니다. 그렇기 때문에 그러한 물질들의 specular reflection은 절대 색이 있지 않습니다. 우리는 재질의 다른 종류에 대해서 나중에 더 다루어 보겠습니다.

BRDF

양방향 반사 분포 함수(BRDF)는 표면의 반사율 특성을 묘사하는 것입니다. 컴퓨터 그래픽에서 여러 다른 BRDF모델들이 있고 몇몇은 물리적으로 그럴듯하지 못합니다. BRDF가 물리적으로 되려면 이것은 에너지 보존과 전시상호(exhibit reciprocity)여야 합니다. 상호에 대해서, 나는 광선의 들어가는점과 나오는점은 BRDF의 결과에 영향을 끼치지 않으면서 서로 반대의 것으로 언급될 수 있다고 주장하는 헬름홀츠 상반원리(Helmholts Reciprocity principle)를 언급합니다.

Substance(섭스턴스 툴)의 PBR 셰이더에서 사용하는 BRDF는 디즈니의 GGX 미세면 분배에 기초하는 "원칙에 입각한" 반사모델에 기초합니다. GGX는 specular 분산에 대해서 가장 정확한 해결책중 하나를 제공합니다. Figure 08에서 보이는것과 같이 더 사실적이라고 여겨지는 더 짧은 highlight과 더 긴 fall off에서의 tail을 가집니다. (그림을 보셔야 이해가 되실 겁니다)



Figure 08

에너지 보존(Energy Conservation)

에너지 보존은 PBR렌더링 솔루션에서 중요한 역할을 합니다. 이것은 표면에 의해 반사되는 빛의 총량은 이것이 받는 빛의 총량보다 작다고 주장합니다. 다른 말로, 표면에서 반사되는 빛은 절대로 표면에 충돌하기 전의 빛보다 강할 수 없다는 말입니다. 아티스트로서 우리는 에너지 보존을 컨트롤할 걱정은 하지 않아도 됩니다. 에너지 보존이 셰이더에 의해서 알아서 된다는 사실은 PBR의 좋은 측면중 하나입니다. 이것은 물리기반 모델의 부분중 하나이며 우리에게 물리보다 아트에 집중할 수 있게 해줍니다.

프레넬 이펙트(Fresnel Effect)

프레넬 반사 요소는 또한 물리기반 셰이딩에서 BRDF의 계수로써 중요한 역할을 합니다. 프랑스 물리학자 Augustin-Jean Fresnel에 의해서 관측된 프레넬효과는 당신이 받는 표면에서 반사된 빛의 양은 당신이 그것을 보는 각도에 영향을 받는다고 말하고 있습니다.

예를들면 물웅덩이를 상상해 봅시다. 만약 당신이 똑바로 수직으로 내려다본다면 당신은 바닥을 볼 수 있을

니다. 이렇게 보는 방법은 당신이 보는 노멀과 표면 노멀이 같습니다. 이제 물 표면을 더 평행하게 바라본다고 했을 때 당신은 물 표면에 specular 반사가 더 강해지는데 느끼고 곧, 물 밑을 전혀 볼 수 없게 될 것입니다. 프레넬은 우리가 전통적인 셰이딩 방식에서 했던 것처럼 PBR에서 컨트롤 할 수 있는 게 아닙니다. 다시 말하지만 이것 또한 PBR 셰이더에서 자동으로 관리하는 물리 요소입니다. 90도의 입사각으로 바라본다면 표면의 거의 100%가 반사를 하고 있을 것입니다.

거친 표면에서 반사율은 더 specular 해지지만 우리는 100% 반사율에는 미치지 못합니다. 문제는 macrosurface와 빛의 각도 때문이 아니라 각각의 미세면의 노멀 각도와 빛의 각도 때문입니다.

왜냐하면 광선들은 다른 방향으로 분산되고 반사는 부드러워 지거나 흐려지게 됩니다. 당신이 macroscopic 레벨에서 얻을 수 있는 것은 모든 미세면에서 얻는 프레넬 효과의 평균값과 같습니다.

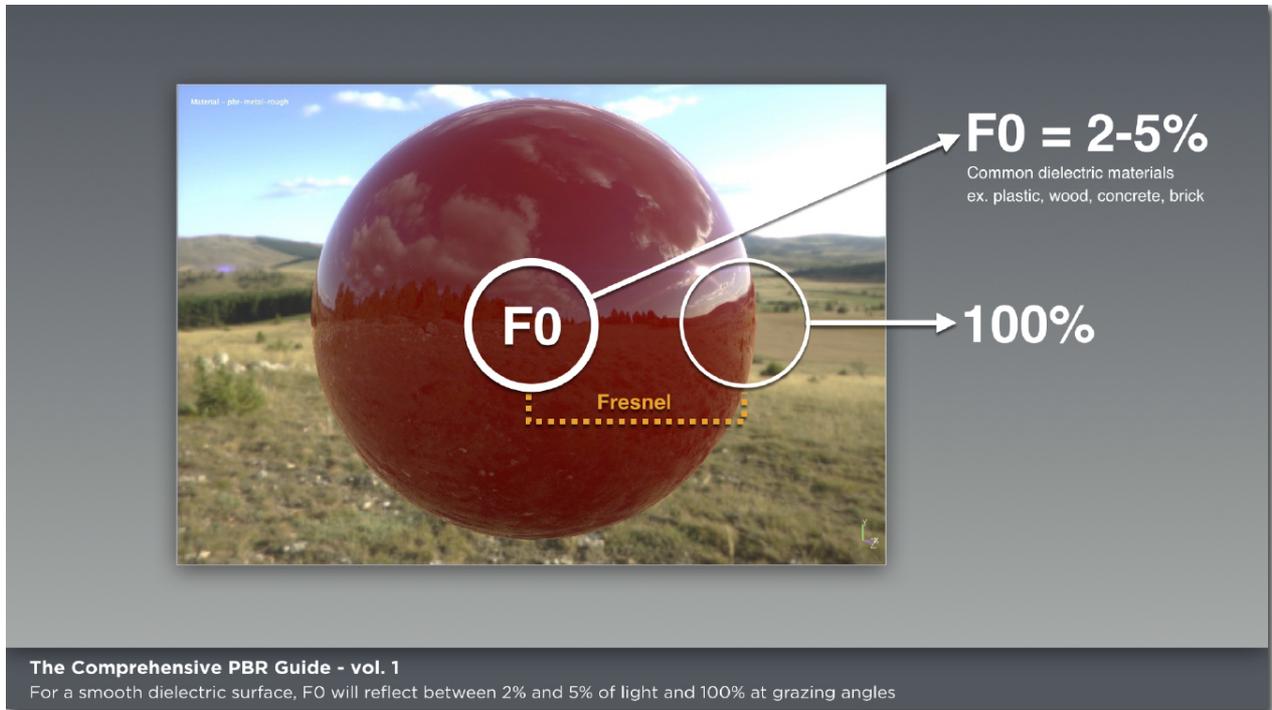


Figure 09

F0 (Fresnel Reflectance at 0 Degrees)

빛이 표면과 0의 각도로 부딪혔을 때 빛이 specular로 반사되는 비율이 존재합니다. Index of Refraction(IOR)을 사용하면 반사되서 돌아오는 빛의 양을 유도할 수 있고 이것은 figure 09에서 보이듯이 F0이라고 불립니다. 표면에서 굴절되는 빛의 양은 $1-F_0$ 이라고 불립니다.

가장 흔한 유전체의 F0 범위는 0.02 - 0.05이며 도체의 경우 0.5 - 1.0 입니다. 표면의 반사율은 figure 10에서 보이는 Sebastien Lagarde의 "Feeding a Physically-based Shading Model"에서 보여지는 방정식을 따릅니다. 이것이 F0 우리가 텍스처를 만들 때 고려해야 하는 반사율 값입니다. 비금속(유전체/부도체)는 회색톤 값을 가지고 금속(도체)는 컬러값을 가집니다. PBR과 반사율의 아트워크 해석에서 우리는 일반적인 부드러운 부도체 표면에서 F0은 2%에서 5% 정도의 빛을 반사하고 거의 수평에 가까워지면 100%의 빛을 반사할 것입니다. 비도체의 사실 반사율값은 매우 급격하게 변하지 않습니다. 비금속의 반사율 범위는 서로 급격하게 벗어나지 않습니다. 보석의 원석들은 그들이 높은 값을 가지고 있기 때문에 예외입니다. 우리는 특별하게 도체와 부도체를 연관시키는 F0에 대해서 조금 있다가 다룰 것입니다.

$$F(0^\circ) = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = 0.02$$

The Comprehensive PBR Guide - vol. 1
 Reflectivity of a surface is determined by the refractive index

Figure 10

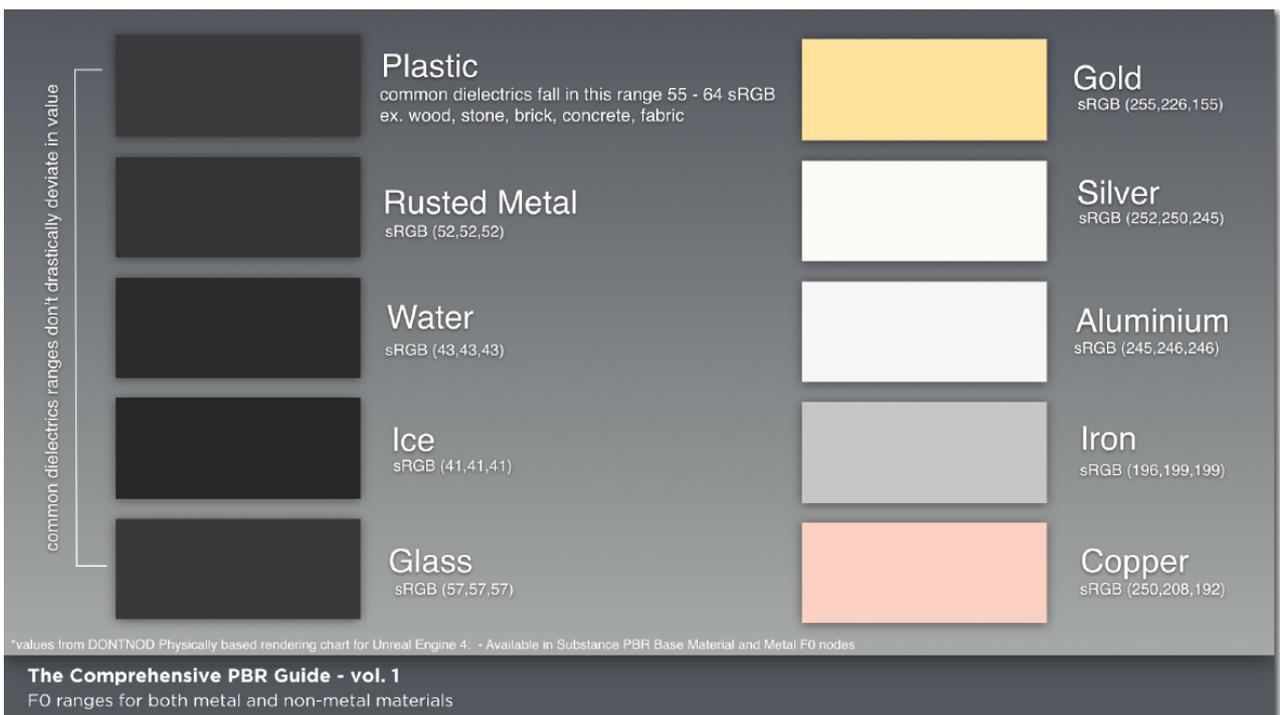


Figure 11

도체와 부도체 (Metals and Non-Metals)

저는 PBR을 위한 재질을 만들 때 금속인지 비금속인지 생각하는 것이 도움이 된다는 사실을 알아냈습니다. 나는 나에게 표면이 금속인지 아닌지 물어보았습니다. 만약 맞다면 하나의 가이드라인을 따를 것이고 아니라면 다른것을 따를 것입니다. 이것은 준금속과 같이 어떠한 것들은 범주에 속하지 않는다는 것을 전제로 하면 더 간단한 접근입니다. 재질을 만드는데 있어서 전체적으로 보면 금속인지 비금속인지 구분하는것은 좋은 접근이며 준금속들은 예외입니다. 재질에 대한 가이드라인을 셋팅할때 우리는 첫번째로 무조건 우리가 무엇을 만들려고 하는지 이해해야 합니다. PBR과 함께, 우리는 금속과 비금속의 특성을 가이드라인들을 통해서 얻을 수 있습니다.

굴절된 빛은 흡수됩니다, 메탈의 색상은 반사된 빛입니다 따라서 우리의 맵에서 우리는 메탈에게 **diffuse** 컬러를 주지 않습니다.

금속(Metals)

금속들은 열과 전기가 잘 통하는 도체입니다. 간단하게 말하면 도체금속의 전기필드는 0이며, 전기와 자기장이 표면과 닿을 때 만들어지는 들어오는 빛의 파장은 부분적으로 반사되고 모든 굴절된 빛은 흡수됩니다. 잘 닦여진 금속의 반사율은 figure 12에서 보여지듯이 70-100%정도로 매우 높습니다.

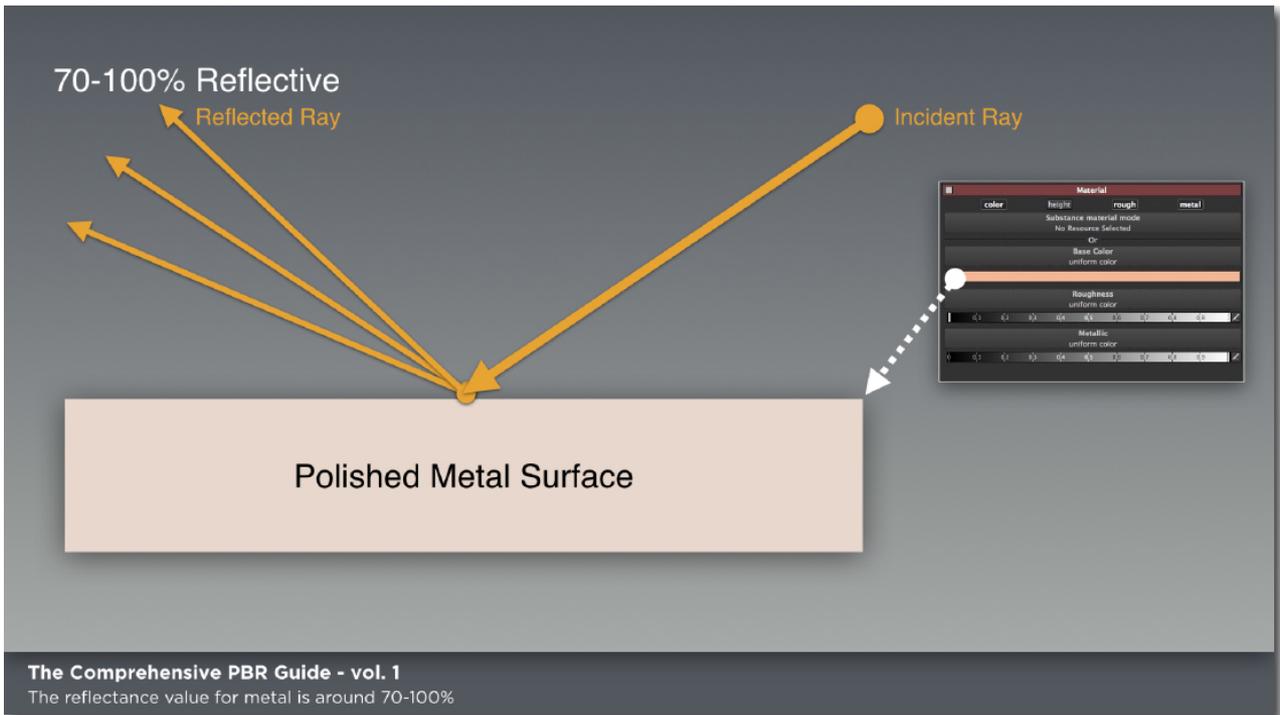


Figure 12

어떤 금속들은 다른 파장에서 빛을 흡수합니다. 예를 들면 금은 파란빛을 **visible spectrum**의 높은 주파수 끝에서 흡수하기 때문에 결과적으로 노란빛을 띄게 됩니다. 그러나 굴절된 빛은 흡수되기 때문에 금속의 색은 반사된 빛에서 오고 우리는 금속에 디퓨즈 컬러값을 주지 않습니다.

예를 들면 **specular/gloss** 워크플로우에서 완전한 메탈은 **diffuse**를 검정으로 주고 굴절률값은 **specular map**의 색상값입니다. 금속에선 굴절률값은 **RGB**가 될 것이고 색상이 될 수 있습니다. 우리는 물리기반모델로 작업하기 때문에 우리는 우리의 맵에 금속의 실제 세상의 계산된 굴절률값을 쓸 필요가 있습니다.

금속을 텍스처링 하는데 있어서 또 다른 중요한 측면은 금속은 부식될 수 있다는 것입니다.

이것은 부식(풍화)요소가 금속의 반사적인 상태에 큰 역할을 한다는 것입니다. 만약 금속이 예를 들어서 부식 되었다면, 이것은 금속의 굴절률값을 변화 시키고 figure 13에서 보여지듯 부식된 부분은 부도체 재료로 다루어져야 합니다.

또한, 색칠된 금속은 부도체와 마찬가지로 금속처럼 다루어지지 않습니다. 페인트는 금속의 표면에 입혀져서 레이어같은 역할을 합니다. 오직 페인트가 칠해지지 않은 날-금속만 금속으로 취급됩니다. 금속재질에 묻은 먼지나 금속을 가리는 어떤 것도 똑같습니다.(금속으로 취급되지 않는다)

나는 위에서 항상 나 자신에게 재질이 금속인지 아닌지에 대해서 물어본다고 주장했었습니다. 하지만 더 자세히 하려면 질문은 칠해졌는지 부식되었는지 먼지가 묻었는지 등의 금속의 상태를 포함해야 합니다.재질은 날-금속이 아니거나 부식에 의해 금속과 비금속 사이에 무엇이 섞여있을 때에는 부도체로 취급될 것입니다.

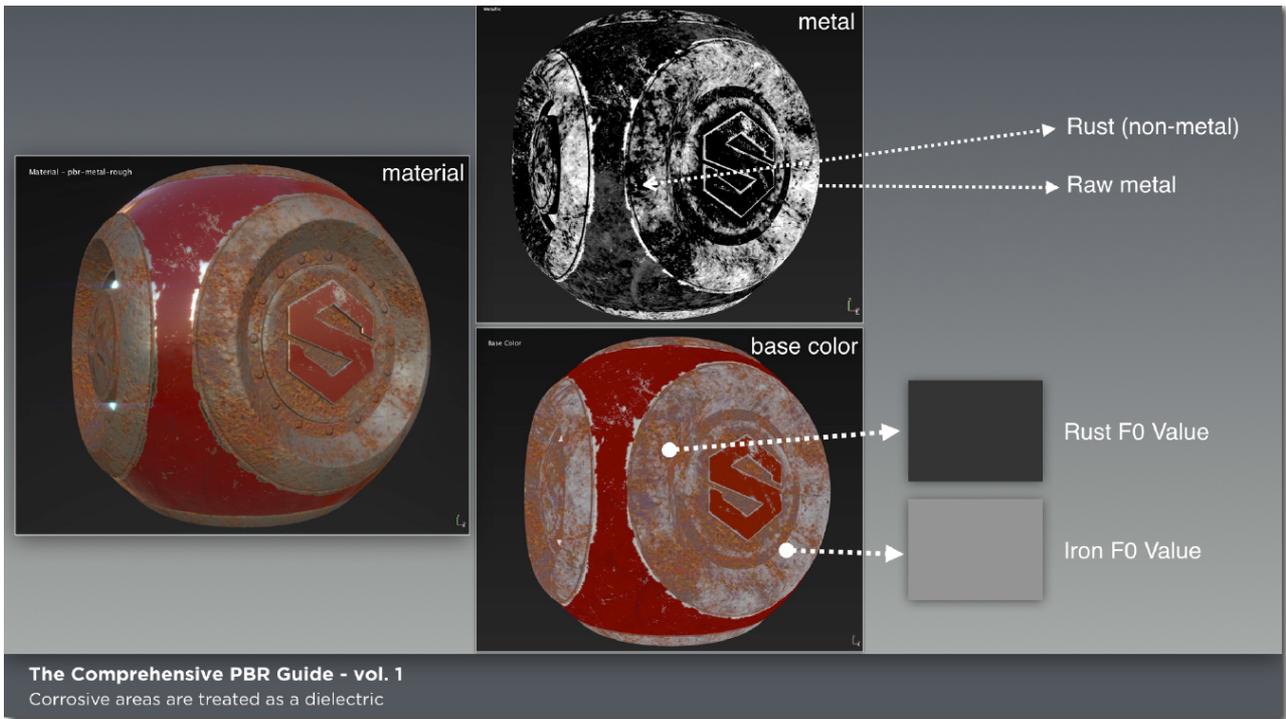


Figure 13

비금속(Non-Metals)

비금속(부도체)들은 전기가 거의 통하지 않습니다. 굴절된 빛은 확산되거나 흡수됩니다. 그리고 그렇기 때문에 그것들은 금속보다 더 작은 빛을 반사시키고 반사색(albedo color)을 가지게 될 것입니다.

우리는 이전에 부도체들의 평균값이 F0서 2-5% 정도인 것을 다루었습니다. 이러한 값들은 figure 14에서 보여 지듯이 0.017 - 0.067의 linear range를 포함하고 있습니다. 보석을 제외하고 거의 모든 부도체들의 값은 4%를 넘지 못합니다.

금속과 같이 우리는 실제세상에서 측정된 값을 써야합니다, 그러나 투명하지 않은 물체의 IOR값을 찾아내는 것은 매우 힘듭니다. 그러나 가장 흔한 부도체 재질들은 그렇게 크게 값이 바뀌지 않습니다. 그렇기 때문에 우리는 굴절을 값에 대해서 볼륨2에서 다룰 적은 수의 가이드라인을 활용할 수 있습니다.

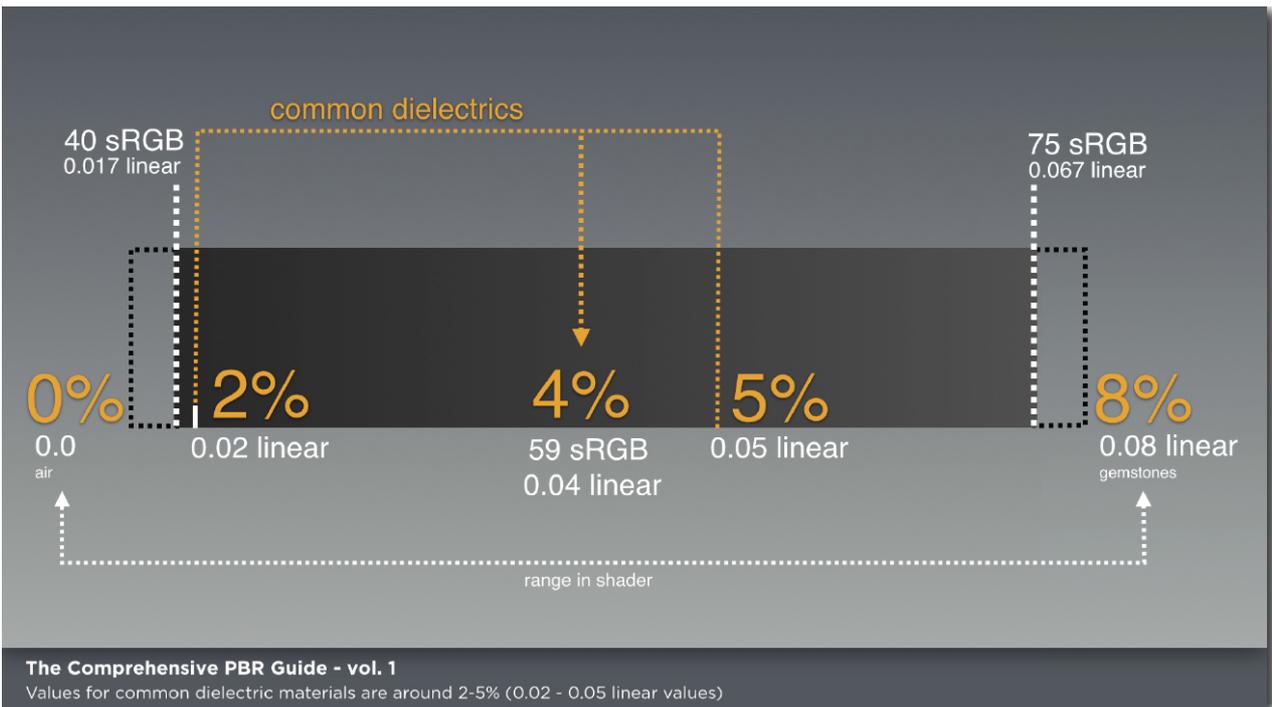


Figure 14

Linear Space Rendering

Linear space rendering 은 이 기사 전체보다도 많은 양을 다룰 수 있습니다. 그렇기 때문에 우리는 그렇게 깊게 들어가진 않을 것입니다. 하지만 중요한 사실은 계산들은 linear space로 계산된다는 것입니다.

간단하게 말하자면 linear space rendering은 빛 계산에 있어서 정확한 수학을 제공해줍니다. 이것은 빛이 실제 세상과 같은 행동을 가지도록 환경을 만들어 주는 것에 관한 것입니다. Linear space에서, 감마는 1.0입니다. 하지만 우리 눈에 정확하게 보이기 위해서는 linear gamma가 수정되어야 합니다. Gamma-encoded space(sRGB)는 컴퓨터에 표시 될 이미지들을 보정합니다. 이미지의 값을 표시를 위해 보정됩니다.

컴퓨팅 색값과 색에 대한 기능을 수행할때 모든 계산은 linear space로 수행됩니다. 그것을 보는 간단한 방법은 만약 이미지가 그러한 기본컬러나 디퓨즈로 보여질 경우 이러한 맵들은 sRGB로 설정되어야 합니다. 이미지가 sRGB로 설정되었을 때 Substance는 이미지를 계산을 위해 linear하게 변환시키고 다시 표시를 위해 sRGB로 변환시킬 것입니다. 그러나 당신이 순수하게 표면의 속성들 거칠기나 metallic을 텍스처에서 표현하기 위해 수학적 값을 저장하려고 한다면 이러한 맵들은 linear로 셋팅되어야 합니다.(색상이 아닌 0~1값을 가지는 grey-scale의 맵을 뜻하는듯)

Substance는 linear/sRGB space사이의 변환 뿐만 아니라 렌더링-뷰포트의 계산된 결과의 감마보정까지 자동으로 처리합니다. 아티스트로서 당신은 linear-space 계산과 substace pipeline에서 일어나는 변환을 걱정할 필요가 없습니다. Substance 통합 플러그인을 통해서 Substance 재질을 사용한다면 linear space를 위한 변환 또한 알아서 해줄 것입니다.

그러나 Substance 맵들이 출력된 비트맵으로 활용되고 더이상 Substance material이 아닐 때 과정을 이해하는 것은 중요합니다. 당신은 아마 당신이 사용하는 렌더러에 따라 수동으로 변환을 다루어야 합니다. 당신은 base color/difuse maps들은 sRGB고 나머지는 linear라는 것을 알아두어야 합니다.

중요 요소(Key Factors)

우리는 물리학의 기본 이론들을 살펴보고 PBR의 핵심요소들을 유도할 수 있습니다.

1. 에너지 보존, 반사된 광선은 절대 첫번째 표면을 강타했을때보다 밝을 수 없습니다. 에너지 보존은 셰이더에서 처리됩니다.
2. 프레벨. BRDF는 셰이더에 의해 처리됩니다. F0 반사율값은 거의 모든 부도체에서 작은 변화만을 보이며 2%-5%의 범위를 가집니다. 금속의 F0값은 70-100%입니다.
3. Specular값은 BRDF를 통해서 조정됩니다. Roughness or glossiness 맵 그리고 F0 반사율 값의 영향을 받습니다.
4. 빛 계산은 linear space에서 계산됩니다. 모든 맵은 감마값을 가지고 있으며 base color나 diffuse들은 보통 셰이더에서 linear로 변환됩니다. 그러나 당신은 이미지를 당신의 게임엔진이나 렌더러에서 불러들일 때 적당한 옵션을 체크함으로써 변환이 적절하게 이루어 졌는지 확인해야 합니다. 표면을 묘사하는 roughness, glossiness, metallic 그리고 height는 linear여야 합니다.

References

1. Physically-Based Shading at Disney Brent Burley, Walt Disney Animation Studios.
https://disney-animation.s3.amazonaws.com/library/s2012_pbs_disney_brdf_notes_v2.pdf
2. Microfacet Models for Refraction through Rough Surfaces
<http://www.cs.cornell.edu/~srm/publications/EGSR07-btdf.pdf>
3. Feeding a Physically-Based Shading Model by Sebastien Lagarde
<http://seblagarde.wordpress.com/2011/08/17/feeding-a-physical-based-lighting-mode/>
4. An Introduction to BRDF Models by Daniël Jimenez Kwast
<http://hmi.ewi.utwente.nl/verslagen/capita-selecta/CS-Jimenez-Kwast-Daniel.pdf>

pdf 원문 : <https://www.allegorithmic.com/pbr-guide>
(텍스처 툴 Substance회사 Allegorithmic의 PBR교육자료)