

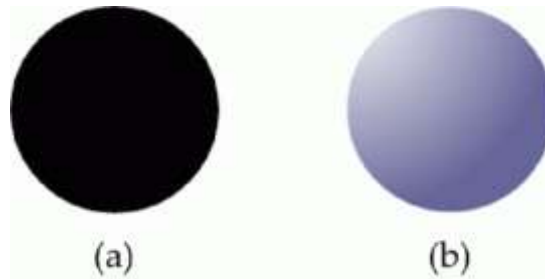
## 10장. 조명과 음영

### 학습목표

- 조명과 음영의 차이점을 이해한다.
- 지역 조명모델과 전역 조명모델의 차이점을 이해한다.
- 광원의 특성과 종류를 이해한다.
- 주변광, 확산광, 경면광 등 지역 조명모델의 요소를 이해한다.
- 플랫 셰이딩, 구로 셰이딩, 폰 셰이딩 등 음영방법의 차이를 이해한다.
- 프로그램에 의해 지엘에서 조명 및 음영을 가하는 방법을 이해한다.

# 빛

- ☞ 하나님이 가라사대 빛이 있으라 하시매 빛이 있었고 그 빛이 하나님이 보시기에 좋았더라 하나님이 빛과 어두움을 나누사 빛을 낮이라 칭하시고 어두움을 밤이라 칭하시니라 저녁이 되며 아침이 되니 이는 첫째 날이니라  
- 창세기 1:3-1:5, New International Version



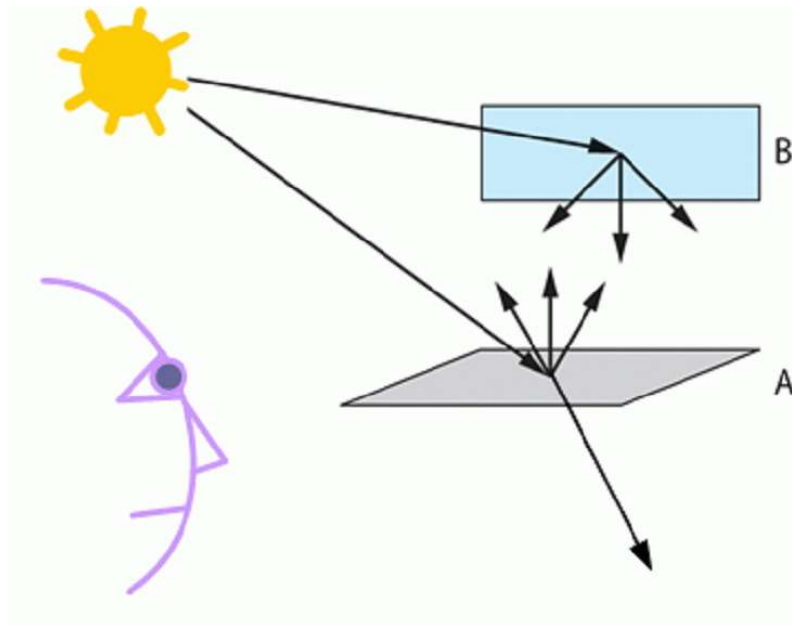
## 👤 렌더링(Rendering)

- 조명(Lighting, Illumination): 물체 정점의 색상을 부여, 물체공간 (Object Space)
- 음영(Shading, Surface Rendering): 조명 결과를 이용하여 물체 면의 색상을 부여: 영상공간(Image Space)



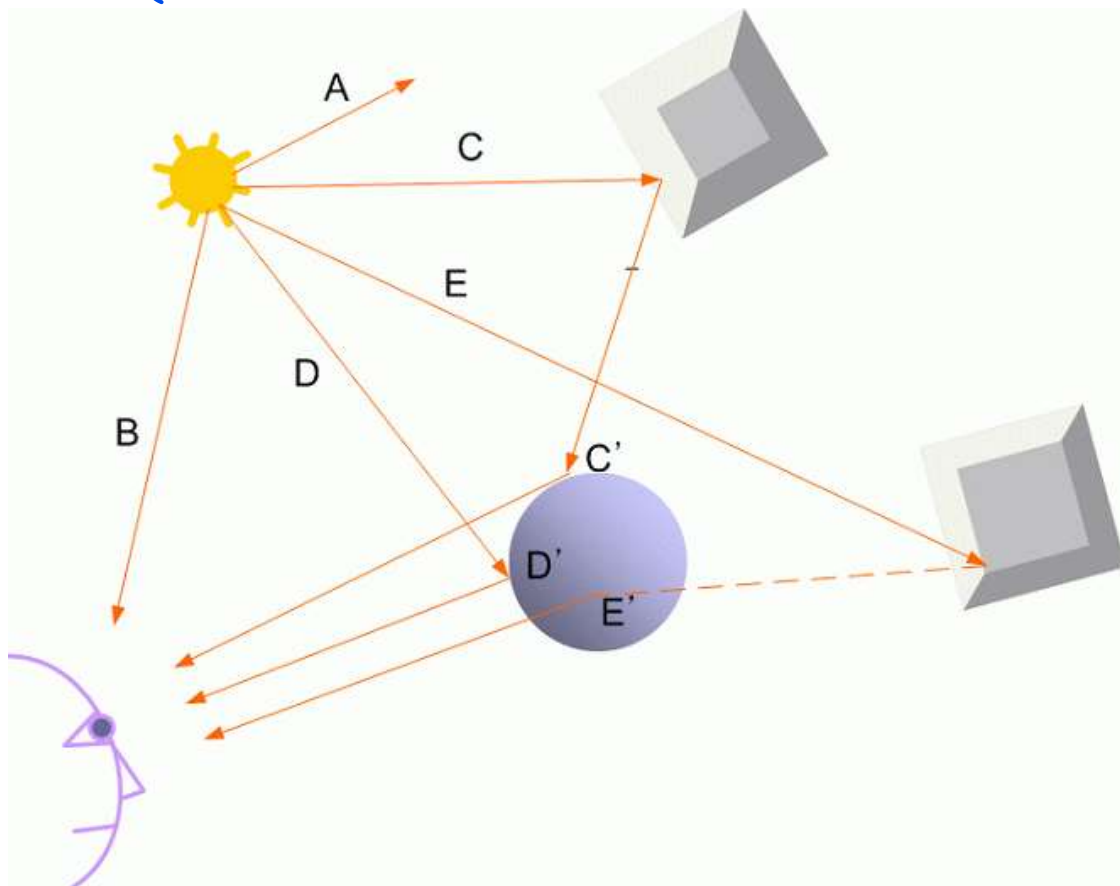
# 빛의 진행

- 👤 광원에서 출발
- 👤 물체 표면에서
  - 흡수 (Absorption)
  - 반사 (Reflection)
  - 투과(Transmission) 또는 굴절(Refraction)
- 👤 물체를 본다는 것은 우리 눈으로 입사하는 빛에 의함
- 👤 물체색: 광원, 물체, 관찰자 위치, 광원과 물체의 특성에 의해 결정



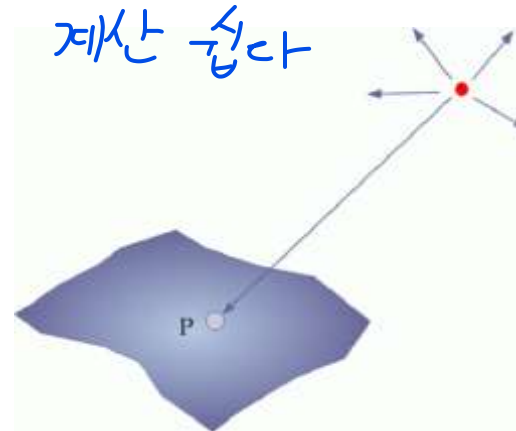
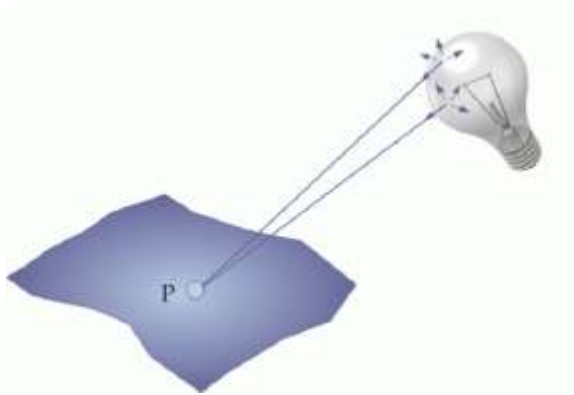
# 조명모델(Illumination Model)

- 전역 조명모델(Global Illumination Model): 다른 물체면에서 반사되어 입사되는 빛까지 고려한 조명모델
- 지역 조명모델(Local Illumination Model): 광원으로부터 직접 물체면으로 입사되는 빛만을 고려한 모델

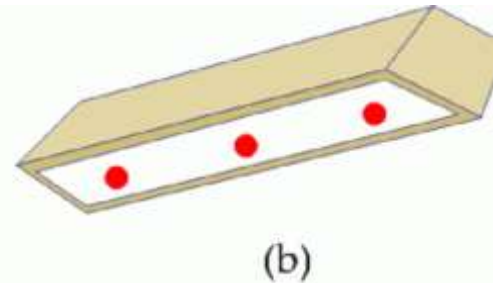
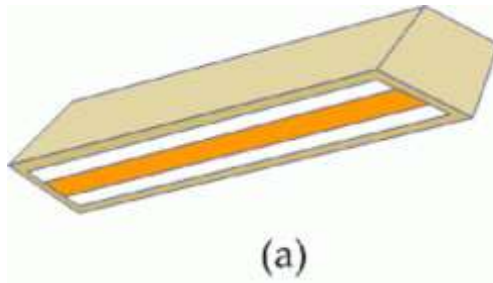


# 광원(Light Source)

🔦 면적광원(Area Light Source)과 점광원(Point Light Source)



🔦 면적광원을 분산 점광원(Distributed Point Light Source)으로 근사화



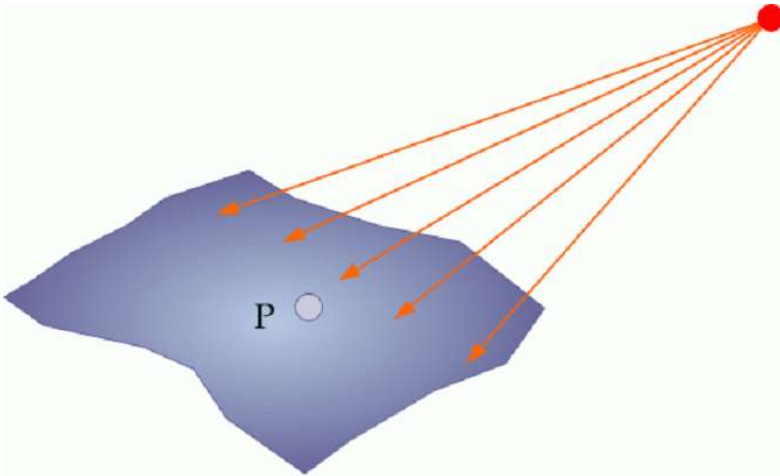
# 광원(Light Source)

## 👤 위치성 광원(Positional Light Source)

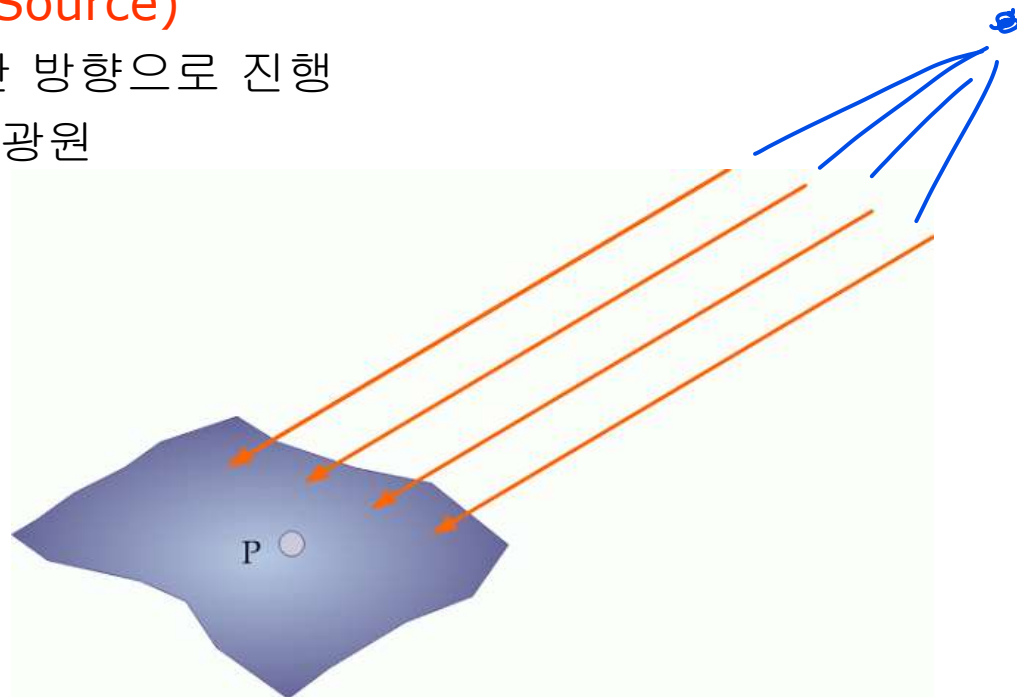
- 옴니라이트(Omni Light), 빛이 모든(Omni) 방향으로 방사형(Radial Direction)으로 진행
- 광원의 위치가 중시됨. 근거리 광원

## 👤 방향성 광원(Directional Light Source)

- 빛이 물체면을 향하여 일정한 방향으로 진행
- 빛의 방향이 중심됨. 원거리 광원



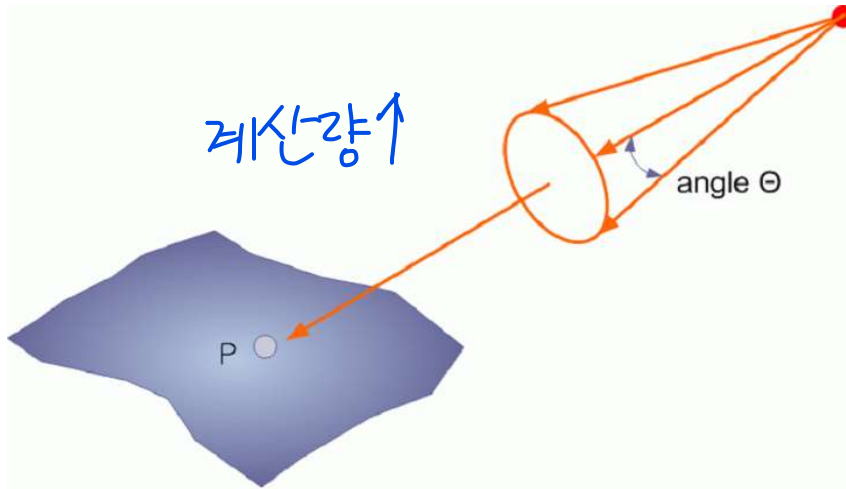
위치성



방향성

# 스포트라이트(Spot Light)

- 👤 위치성 광원과 유사
  - 빛이 방사형으로 진행
  - 광원이 유한 거리에 존재
- 👤 방향성 광원과 유사
  - 하나의 방향을 향해서만 진행
- 👤 차이점
  - 일정한 각 범위 내로만 진행. 포로수용소의 탐조등





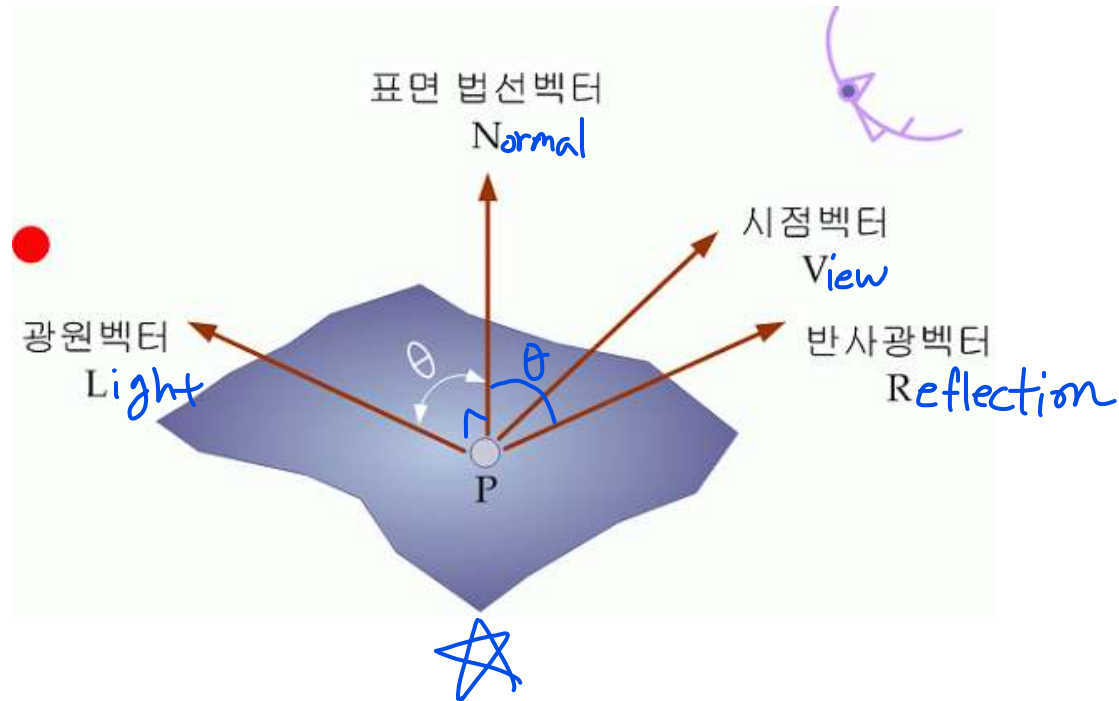
## 조명관련 벡터

### 👤 조명관련 벡터

- 입사각: 광원벡터와 물체 표면의 법선벡터가 이루는 각

$$N \cdot L = |N||L|\cos\theta = (1)(1)\cos\theta = \cos\theta$$

- 반사각: L과 R은 N을 중심으로 대칭



## 주변반사(Ambient Reflection)

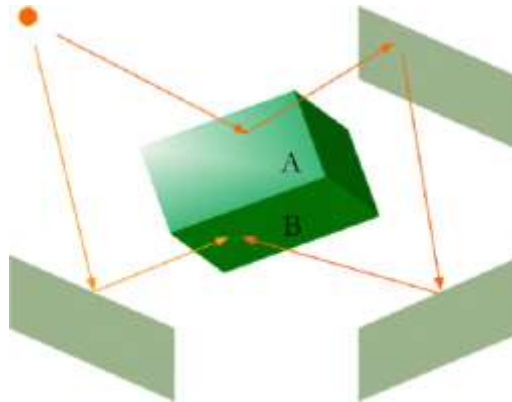
- 👤 광원에 직접 노출되지 않는 면에 밝기를 부여
  - B면은 직접 빛을 받지 않으나 실세계에서 완전한 검정색은 아님
  - 주변의 복잡한 경로를 통해 B면에 빛이 도달함
- 👤 모든 빛의 경로를 추적하기 어려움
  - 면마다 상수 크기의 밝기를 임의로 추가
  - 전역 조명모델 효과를 근사적으로 부여

$$I = S + A + D$$

S: 경면 반사

A: 주변 반사

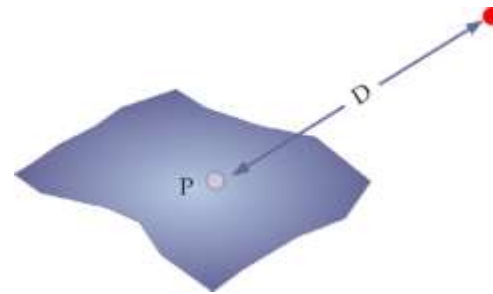
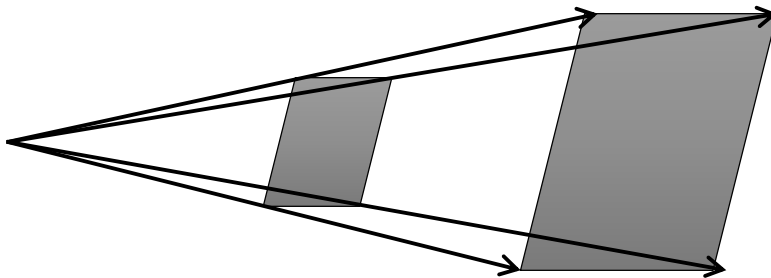
D: 확산 반사



## 거리에 따른 빛의 약화

방사형으로 퍼져나가는 빛을 가정하자.

- 빛이 두 배 거리를 전진하면, 빛이 닿는 면적은 제곱인 4배에 도달함
- 관찰자가 측정하는 빛의 세기는 빛과의 거리 제곱에 반비례



$$\text{Ambient Reflection} = \frac{K_a I_a}{D^2}$$

Ia: 광원의 주변광 세기 조명의 세기

Ka: 주변광 계수, 반사율 물체의 반사율

D: 는 거리인데 무시하자

## 주변광 계수 변화

👤 주변광만 부여



👤 여타 반사광 + 주변광

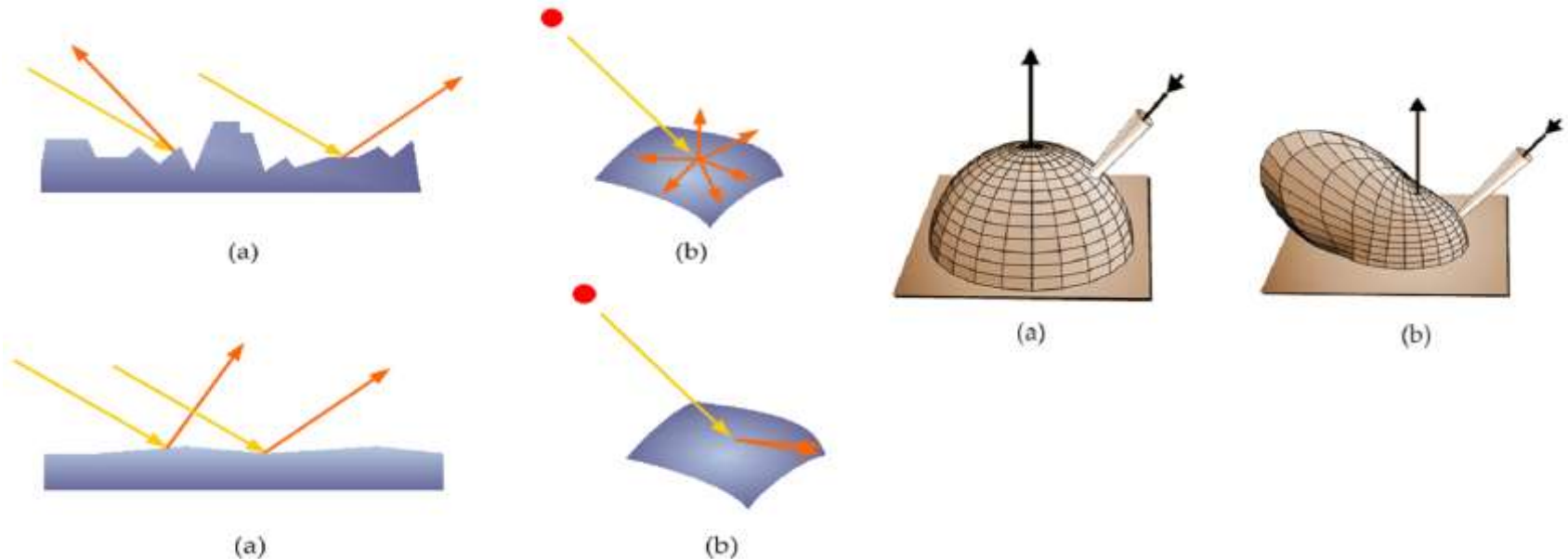


## 확산반사(Diffusive Reflection)

난반사에 해당 종이같은 무광

완벽 확산체(Perfect Diffuser)와 방향성 확산체(Directional Diffuser)

- 완벽 확산체 (입사된 빛을 모든 방향으로 완벽하게 고르게 반사함)
  - 관찰자는 어느 위치에서 보아도 동일한 밝기를 느낌
  - 지역조명 모델의 그래픽 처리를 단순화하기 위해서 완벽 확산체를 가정 → 눈의 좌표를 고려하지 않고 계산 가능
- 방향성 확산체 (입사광의 대칭 방향으로 더 많은 빛이 반사됨)
  - 관찰자가 확산 방향에 근접하면 물체가 더욱 밝게 보임



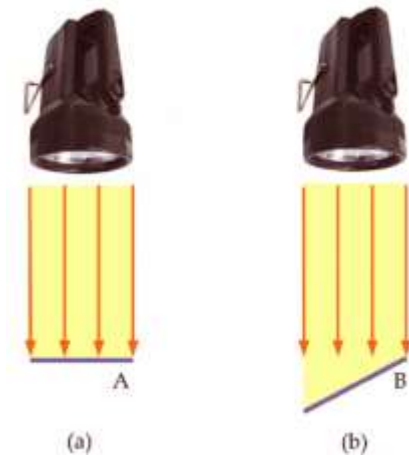
## 확산광의 세기

- 입사광의 세기가 절대적
- 물체면이 빛을 받는 방향에 따라 다름
  - 람베르트 법칙(Lambertian Law)
    - 입사각: 광원벡터, 법선벡터 사이각
    - 면의 밝기는 입사각의 코사인에 정비례.

$$\text{Diffusive Reflection} \propto \cos \theta$$

- 확산광의 세기
  - $I_d$ : 광원의 확산광 세기
  - $K_d$ : 확산광 계수, 반사율

$$\begin{aligned} \text{Diffusive Reflection} &= K_d I_d \cos \theta / D^2 \\ &= K_d I_d (N \cdot L) / D^2 \end{aligned}$$



Cosine Law:  $E_\theta = E * \cos(\theta)$

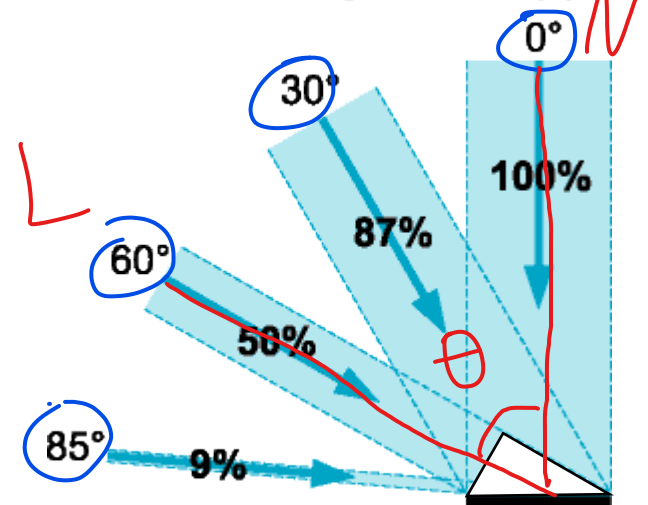


Fig. 6.3 Lambert's cosine law.

## 확산광 효과

👤 면이 서 있는 방향에 따라 차등적 밝기

- 입체감 부여
- cf. 주변광

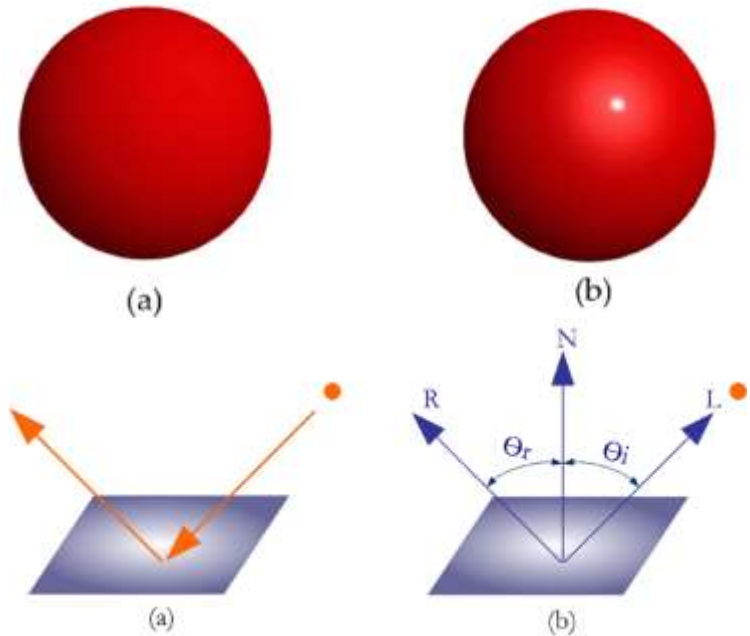
👤 영상의 밝기를 관찰하면,

- 입체적인 공이 존재하고, 조명의 위치가 우상단, 우측 중앙, 정중앙에 있는 것으로 느껴짐



## 경면반사(Specular Reflection)

- 반질반질한 표면에서 반사되는 빛 **당구공 같은 유광**
  - 정반사에 의함
  - 물체의 색이 아니라 광원의 색을 관찰하게 됨 (거울)
  - cf. 주변광, 확산광: 광원의 색이 물체의 색과 상호작용
- Ex. 확산, 확산+경면



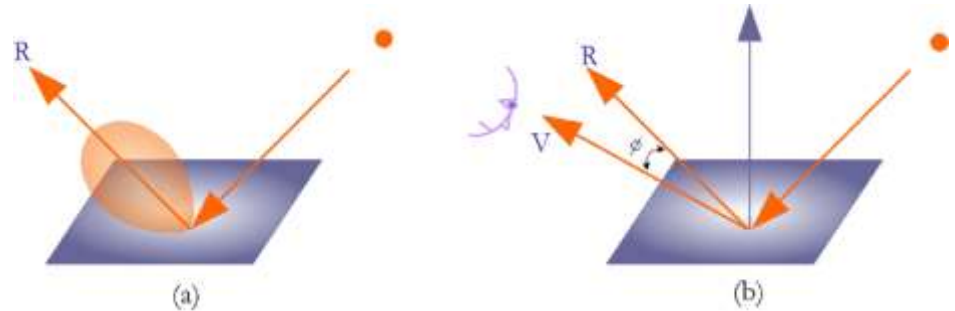
- 입사각과 반사각이 동일
  - 시점이 정확히 R과 동일할 때 느낌



# 경면광 분포와 Phong 반사모델

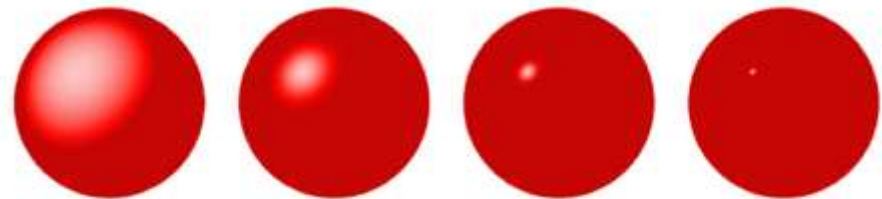
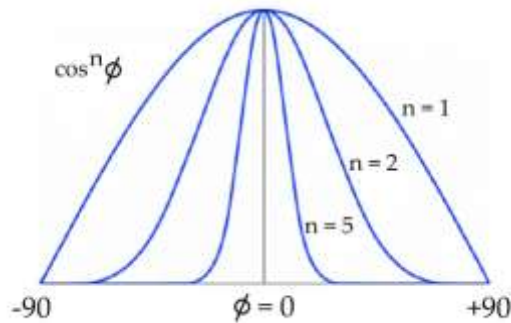
실제적으로는 **Lobe** 모습

- 약간의 차이가 있어도 밝음
- R과 V사이의 각도
- 우선,  $\cos \Phi = R \cdot V$  이용



Phong 반사모델(Phong Illumination Model)

- 광택계수(Shininess Coefficient)



경면광의 세기

$$Specular\ Reflection = K_s I_s (\cos \phi)^n / D^2$$

$$= \frac{K_s I_s (R \cdot V)^n}{D^2}$$

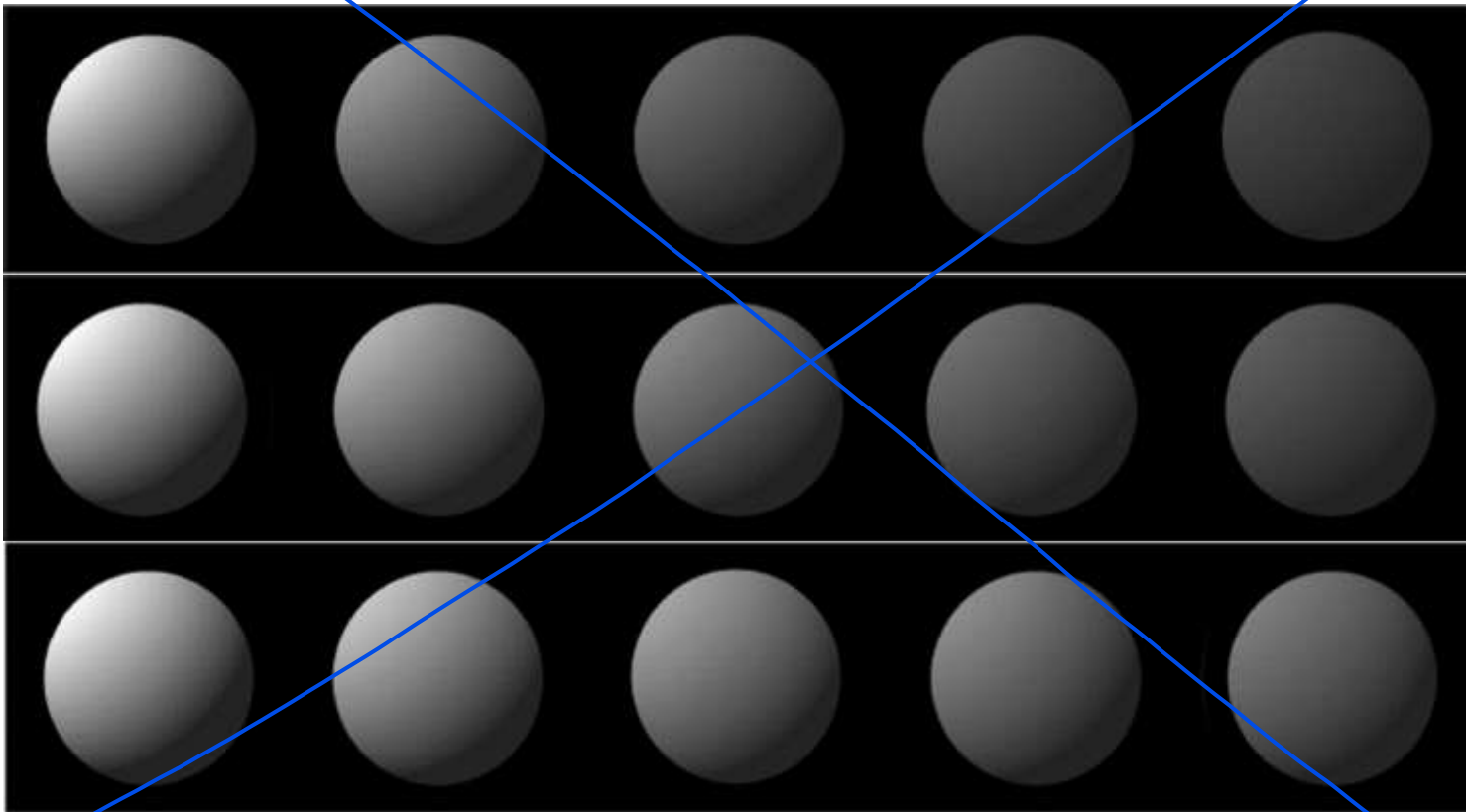
근사값

## 약화함수(Attenuation Function)

👤 지엘에서는 거리에 따른 약화를 수식으로 표현

$$f_{attenuation} = \frac{1}{a + bD + cD^2}$$

👤  $a = b = 0, c = 1,$     $a = b = .25, c = .5,$     $a = c = 0, b = 1$



## 확산계수, 경면계수, 광택계수

- 확산계수 0.01, 0.3, 0.7 (ambient, 전반적으로 밝아짐)



- 경면계수 0.0, 0.4, 0.8 (specular, 반사광으로 광택 느낌 강조)



- 광택계수 5, 40, 100 (specular, 반사부위가 좁아짐, 더 매끈한 느낌)



## 지역반사 모델 정리

### 👤 $I_a, I_d, I_s$

- 조명의 세기 (조명 특성, 장면을 구성하는 조명에 부여하는 값)

### 👤 $K_a, K_d, K_s$

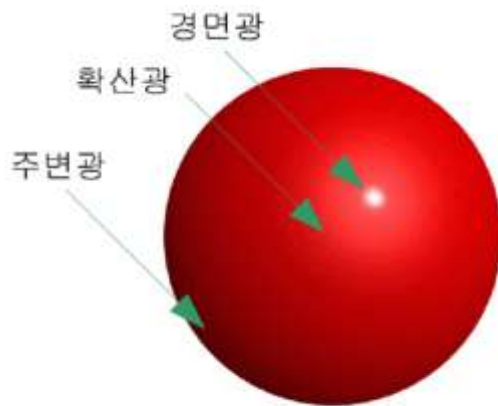
- 물체의 반사율 (각 물체, 삼각형에 부여하는 값)

### 👤 $N$ (한 삼각형의 법선벡터), $L$ (조명 방향), $V$ (관찰 방향), $R$ ( $L$ 의 $N$ 대칭)

### 👤 $n$ (경면계수), $a, b, c$ (도형과 조명 사이의 거리로 인한 감쇠)

*$I = \text{Ambient Reflection} + \text{Diffuse Reflection} + \text{Specular Reflection}$*

$$= \frac{1}{a + bD + cD^2} \left( \underline{K_a I_a} + \underline{K_d I_d (N \cdot L)} + \underline{K_s I_s (R \cdot V)^n} \right) \star$$



## 지엘의 조명

- 물체의 색:  $R, G, B$  별로 빛의 세기를 별도 계산
- 최종적으로 합성
- 관찰자가 느끼는 에너지의 세기
- $R$ 의 강도:  $Ka_r Ia_r + Kd_r Id_r (N \cdot L) + Ks_r Is_r (R \cdot V)^n$
- $G$ 의 강도:  $Ka_g Ia_g + Kd_g Id_g (N \cdot L) + Ks_g Is_g (R \cdot V)^n$
- $B$ 의 강도:  $Ka_b Ia_b + Kd_b Id_b (N \cdot L) + Ks_b Is_b (R \cdot V)^n$
- 만약,  $Ka = Kd = Ks = (r, g, b) = \underline{(1, 0, 0)}$  이라고 가정하자.
- 위 식에 대입하면,
  - 관찰자가 느끼는  $R = Ia_r + Id_r (N \cdot L) + Is_r (R \cdot V)^n$
  - $G, B = 0$
- $R$ 에 대해서만, 입사하는 빛의 에너지를 그대로 반사한다.
  - 우리는 이 물체를 빨간색 물체라고 부른다.
- 결론: 인간이 지각하는 물체의 색상을  $K$ 에 입력하면 잘 동작함

## 지역 조명모델 알고리즘

- 1. 광원이 여러 개인 경우는 각각의 광원에서 나오는 빛을 모두 합산
- 2. R, G, B 색에 대해 별도로 적용하여 합산
- 3. 광원특성은 반사광 종류별로  $I_a, I_d, I_s$
- 4. 물체특성은 반사광 종류별로  $K_a, K_d, K_s$

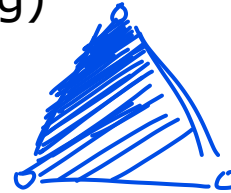
```
For Each Object of the Scene {  
    For Each Polygon Mesh of the Object {  
        Calculate N, L, V, R, D;  
        For Each Light Source {  
            For Ambient Reflection  
                Calculate R, G, B Reflection Separately;  
            For Diffuse Reflection  
                Calculate R, G, B Reflection Separately;  
            For Specular Reflection  
                Calculate R, G, B Reflection Separately;  
            Add R, G, B Colors Separately;  
        }  
        Add R, G, B Colors Separately;  
    }  
}
```

모든 물체에 대해  
모든 다각형에 대해  
벡터 및 거리 계산  
모든 광원에 대해  
주변반사에 대해  
색별로 계산  
확산반사에 대해  
색별로 계산  
경면반사에 대해  
색별로 계산  
주변광, 확산광, 경면광을 합산  
모든 광원의 영향을 합산

# 음영(Shading)

## 음영 또는 표면 렌더링(Surface Rendering)

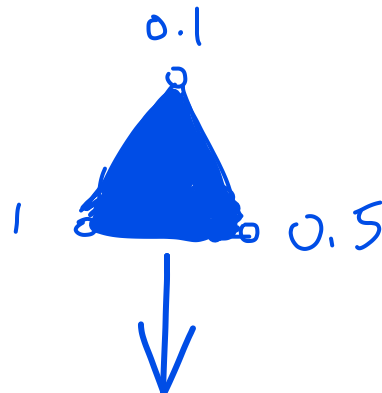
- 물체 면의 색을 부여



## 플랫 셰이딩(Flat Shading)

- 주어진 하나의 다각형 전체를 동일한 색으로 칠함. 빠르고 간단
- 상수 셰이딩(Constant Shading), 깎은 면 셰이딩(Facet Shading)
- 다각형을 구성하는 다각형 정점의 위치를 평균하여 중심점(Centroid)를 구함. 중심점에서의 법선벡터, 광원벡터, 시점벡터를 기준으로 조명모델이 가해지며 그 결과 색이 면 내부를 모두 채움.

점하나 정해서 다 똑같이 칠함



# 플랫 셰이딩

## 마하밴드 효과(Mach Band Effect)



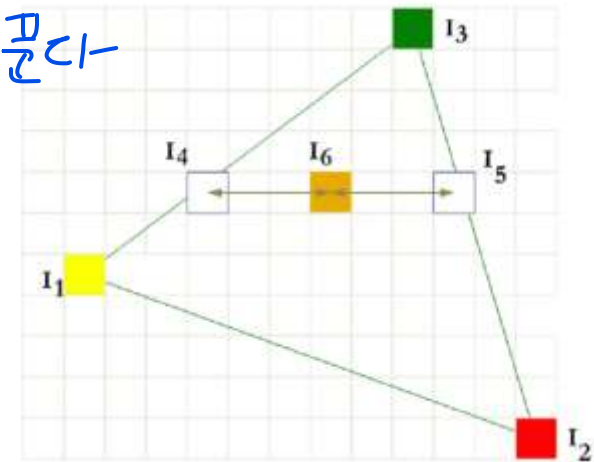


# 구로 셰이딩(Gouraud Shading)

- 다각형 내부를 서로 다른 색으로 부드럽게 채우는 방법 (그라데이션)
- 정점의 색을 보간
  - 삼각형을 구성하는 각 픽셀(fragment)의 색상은, 삼각형의 꼭지점 색상을 평균하여 결정 (거리에 따른 선형 보간)

- $I_4 = I_3$ 과  $I_1$ 의 4:2 내분
- $I_5 = I_3$ 와  $I_2$ 의 4:6 내분
- $I_6 = I_4$ 와  $I_5$ 의 3:3 내분
- 물음:  $I_7$

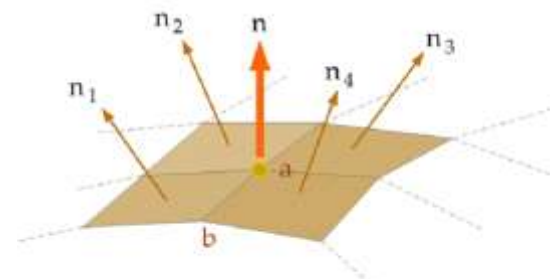
4/2 비율로 분배



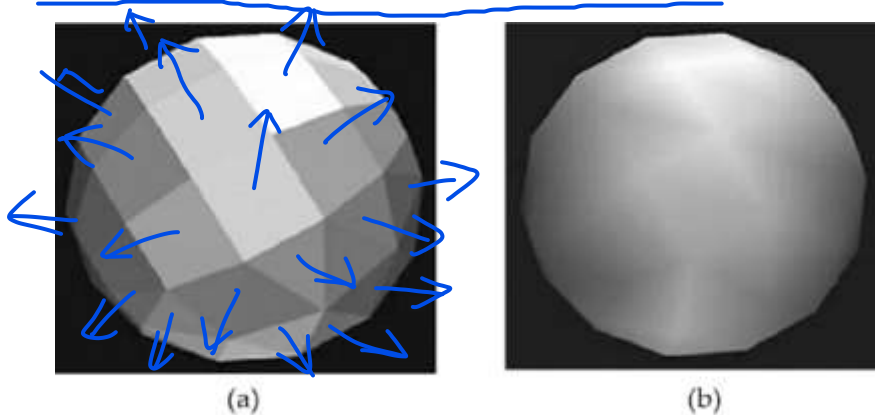
- 각 정점에서 색상 결정(조명 연산) 필요
  - 정점에서 법선벡터를 얻어야 함: 임의로 부여하거나 계산함
- 특징 (삼각형의 꼭지점 3개 << 삼각형을 구성하는 픽셀 수십 개)
  - 복잡한 조명 연산은 상대적으로 개수 적은 정점에서만 수행
  - 개수가 많은 픽셀의 색상은 평균만 계산하면 되므로 속도 빠름

## 구로 셰이딩

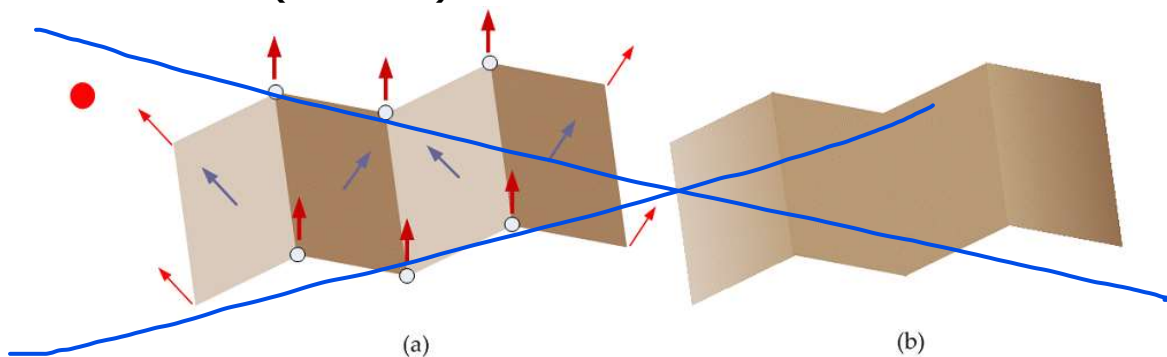
- 👤 평면이 아닌 꼭지점에서의 법선 벡터 계산
  - 뾰족한 점에서의 법선 계산은 수학적으로 불가
  - 인접면들의 법선벡터를 평균하여 구함
- 👤 플랫 셰이딩보다는 부드러움
  - 마하 밴드 효과는 일부 남아있음



$$n = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + n_4}{|n_1 + n_2 + n_3 + n_4|}$$



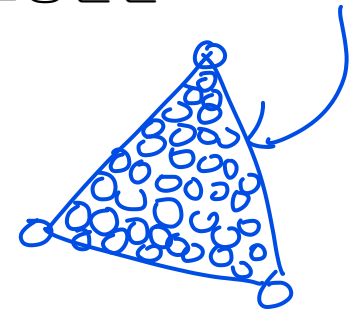
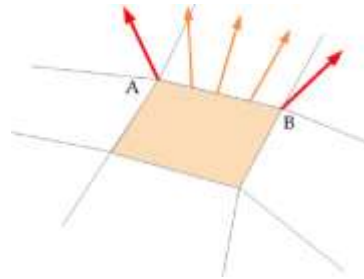
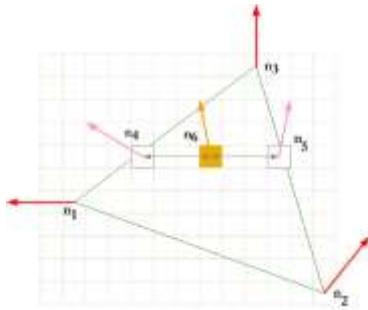
- 👤 경우에 따라서 (평균의) 오류



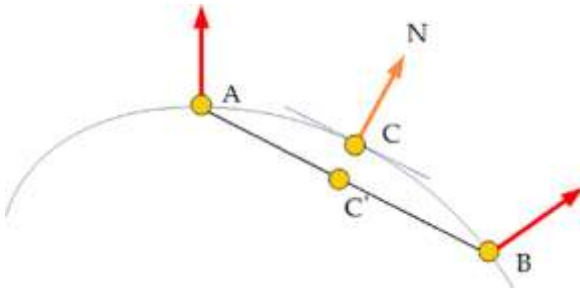
# 퐁 셰이딩(Phong Shading)

- 개수가 많은 모든 픽셀에 대해, 조명 연산 수행
  - 각 픽셀에 대해 법선 벡터를 구해야 함
- 정점에 법선 벡터가 저장되어 있으므로, 픽셀에서는 법선벡터를 보간
  - 구로 셰이딩: 정점에서 조명연산 -> 픽셀에서 색상 보간
  - 퐁 셰이딩: 픽셀에서 법선 벡터 보간 -> 픽셀에서 조명연산

$$I = A + D + S$$

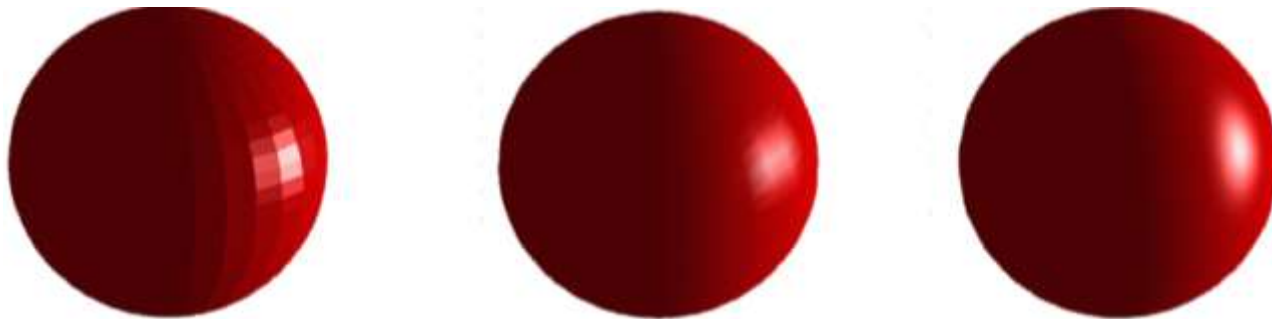


- 곡면의 기울기가 복원됨: 곡면에서 경면광을 계산하는 효과 (화질 향상)



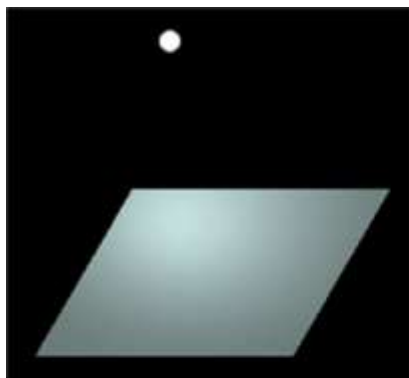
## 음영결과 비교

👤 플랫, 구로, 폰

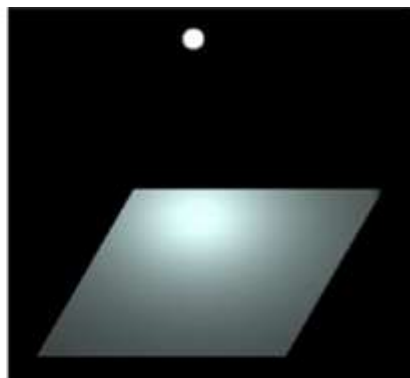


👤 구로, 폰

- 밝기를 보간하는 구로 셰이딩은, 정점보다 밝은 색상의 픽셀이 존재할 수 없다.
- 법선벡터를 이용하여 픽셀마다 조명 연산하는 폰 셰이딩은, 조명의 각도가 잘 맞아 떨어지는 경우 면 내부가 매우 밝아질 수 있다.



(a)

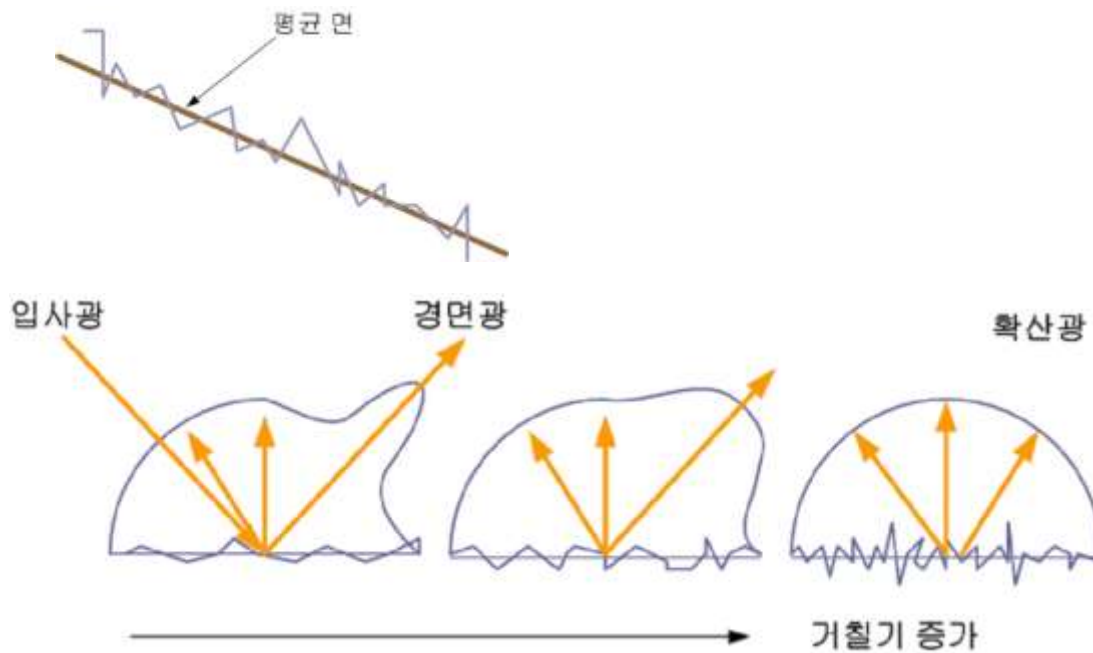


(b)

# 미세면 모델(Microfacet Model)

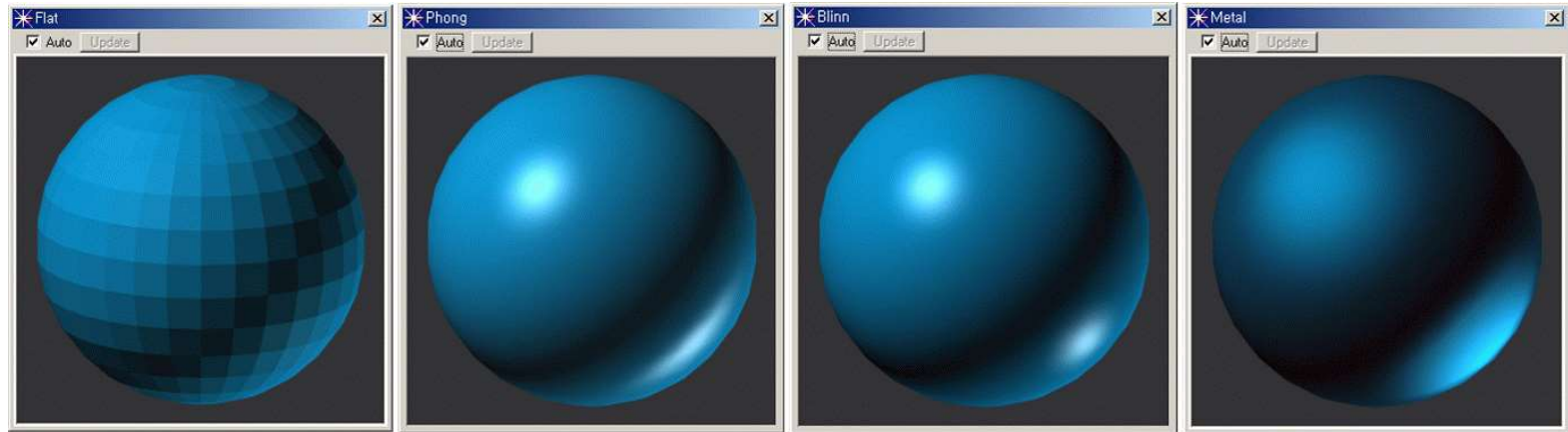
## 👤 표면의 거칠기(Roughness)를 모델링

- 평균면의 방향을 기준으로
- 표면의 거칠기라는 매개변수를 사용해서 미세면의 굴곡이나 모양을 조절



# 미세면 모델(Microfacet Model)

플랫, 폰, 블린, 쿡/토렌스



블린 셰이딩

- 폰 셰이딩과 유사. 경면광 성분이 더욱 부드럽게 퍼져나감. 광원이 거의 물체면과 나란히 예각으로 입사한 것과 유사

쿡/토렌스 셰이딩(메탈 셰이딩)

- 금속표면의 은은한 경면광 처리에 유리.
- cf. 폰 모델: 플라스틱 재질 처리에 유리