광학개론(1)

정 해 빈
삼양광학공업(주) 부설연구소부소장

1. 서 론

1.1 빛의 본질

사람이 외부로부터 받아 들이는 정보의 90% 이상이 시각을 통하여 받아 들여지기 때문에 옛날부터 빛의 본질이 무엇인가 하는 문제가 인류의 중요한 관심사의 하나였다.

뉴우튼(Newton)은 빛을 입자로 본 입자설을 주장하였는 데, 이러한 입자설은 빛의 속도가 진공 중에서보다는 물질속에서 느려진다는 사실에 의해서 그 근거를 마련할 수 있었다. 하지만, 입자설만으로는 그때까지 알려져 있던 현상 중의 일부를 설명할 수 없었다. 이에 호이겐스(Huygens)와 영(Young)은 빛을 파동이라고 하는 파동설을 가지고 빛의 본질을 설명하려 하였다. 이러한 파동설의 근거로는 빛의 회절과 간섭현상을 들 수 있다. 즉, 빛은 날카로운 장애물의 뒤로 휘어져 지나가거나, 빛과 빛이 상호작용을 일으켜 원래의 빛보다 더욱 밝아지거나 어두워지는 데, 이러한 현상은 파동에서 보편적으로 일어나는 현상이다. 그 뒤에 플랑크(Planck)가 에너지는 언제나 불연속적인 양(이른바 양자)만큼 방출된다는 가정하에서만 많은 현상들이 설명될 수 있음을 발견하였고, 이러한 가정이 옳다는 것은 광전효과에 의해서 입증되었다. 플랑크의 양자론은 언뜻 보기에는 뉴우튼이 주장한 입자설의 재등장 같이 보이지만 피상적으로만 비슷할 뿐 그 본질에 있어서는 전혀 다르다.

오늘날에는 물리학자들이 빛을 설명하는 데 있어 파동론과 양자론이 함께 사용되고 있으며, 이때에 빛의 양자를 특히 광량자(光量子 : photon) 라 부르고 있다.

1.2 광학의 분야

빛의 특성을 연구하는 학문을 광학이라고 하는 데, 광학은 통상적으로 그것을 다루는 문제점에 따라 다음의 세 분야로 나뉘어진다. 이러한 각각의 분야에 있어서 빛을 어떻게 취급하느냐하는 것은 서로 다른 일련의 법칙위에서 성립되고 있다.

기하광학은 빛을 입자로서 취급하는 입장을 취하고 있다. 이러한 입장을 취하게 되면 빛의 진행은 광선(ray)이라고 하는 직선으로 표시할 수 있고 이러한 광선의 경로를 기하학적으로 다뤄주게 되므로, 기하광학이라는 이름이 붙었다. 이의 주된 연구대상으로는 빛의 직진, 굴절, 반사 등이며, 응용 분야로는 광학기기의 설계가 있다. 우리가 흔히 알고 있는 렌즈, 카메라, 망원경, 현미경, 잠망경 등은 이 분야의 산물이며

역사적으로도 이 분야는 가장 오래된 분야이다.

파동광학은 빛이 파동으로서 존재한다는 가정하에 성립한다. 여기에서는 광선 대신에 파동이 동일한 위상(phase)을 갖게 되는 파면(wave front)으로 빛을 나타내며 빛의 파장, 주파수, 진폭, 위상 등이 빛의 성질을 규정짓는 주요한 요소가 된다. 연구대상으로는 빛과 물체간의 작용인 회절과, 빛과 빛간의 반응인 간섭이 있으며, 간섭계, 레이저 속도계 등은 파동광학을 응용한 좋은 예이다.

끝으로 양자광학은 빛이 에너지의 양자, 즉, 광자로서 이루워져 있다는 가정으로부터 출발하며, 빛이 물질에 의해 흡수되거나 방출될 때의 효과 등을 마이크로적으로 연구할 때 사용된다. 각종 레이저의 동작원리와 그 레이저에서 나오는 빛의 파장, 증폭률 등이 이 분야의 주된 연구대상이다.

1.3 전자기파로서의 빛

이미 말한 바와 같이 빛의 많은 성질들은 빛이 파동의 성질을 갖는다고 가정할 때 설명이 가능하다. 음파의 경우는 공기나 그 밖의 물질을 매개로 하여 전파되지만 광파(light wave)는 물질이 전혀 없는 진공 중에서도 자유롭게 전파되며 그 속도는 30만km/초에 이른다. 빛은 공기 중에서의 속도가 거의 진공 중에서와 같으나 물속에서는 3/4정도로 줄어 들며, 유리 속에서는 2/3정도가 된다.

빛 이외에도 많은 형태의 파동들이 진공 중에서 빛과 동일한 속도로 전파된다는 것이 알려져 있는데, 이러한 것들을 모두 묶어서 전자기파라고 한다. 모든 전자기파는 진행방향과 진동방향이 동일한 음파와는 달리 그들의 진행방향에 수직한 방향으로 진행하는 횡파이다.

파동의 진행방향에서 파동상의 한 점에서 다음 파동의 동일한 점까지의 거리를 파장(wavelength) 이라 하며, 통상적으로 그리스 문자 람다(λ)로 표시한다. 또한, 어떤 고정된 점을 1초 동안에 지나가는 파동의 수를 주파수(frequency) 라 한다. 서로 다른 여러 종류의 전자기파들은 그 파장 또는 주파수에 의해서 구분된다. 횡방향으로의 이동량 최대치를 진폭이라 하며 이 진폭의 제곱은 빛의 강도를 나타낸다.

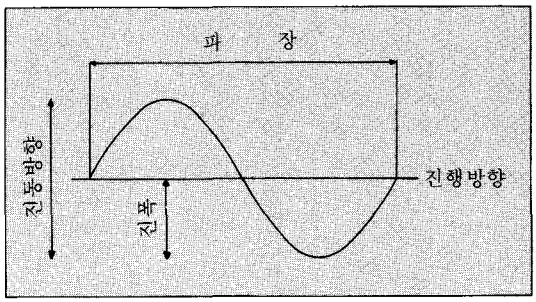


그림 1-1 광파의 개략도

그림 1-1은 횡파를 개략적으로 나타낸 것으로 파장과 진폭이 설명되어 있다. 그림에서는 광선이 한 평면, 즉, 종이 위에서만 진동하는 것으로 나타나고 있으나 실제에 있어서는 빛의 진행방향에 수직한 모든 방향으로 진동하는 것이 일반적이다. 그림에 나타낸 것과 같이 한 방향으로만 진동하는 빛을 편광(polarized light)이라고 한다.

어떤 파동의 파장과 주파수를 곱해주면 파동이 1초 동안에 가는 거리, 즉, 전파속도가 된다.

1.4 전자기파의 스펙트럼과 빛의 영역

진공 중에서 전파되는 여러 전자기파들에 대해서 생각해 보면 어떤 것들은 파장이 빛보다 짧고 어떤 것들은 빛보다 길다. 이와 같은 여러 전자기파를 파장의 순서에 따라 쭉 늘어 놓은 것을 전자기파의 스펙트럼이라 한다. 스펙트럼상에서의 각 전자기파의 영역을 살펴보면 그림 1-2와 같다. 하지만 이러한 각 전자기파간의 경계가 명확한 것은 아니다.

이러한 전자기파의 스펙트럼 중에서 사람의 눈에 감지되는 이것을 이른바 가시영역(vigible range)이라고 한다. 결국, 좁은 의미에서는 이러한 가시영역만이 빛인 셈이지만 이 가시영역에 인접한 빛보다 파장이 긴 적외선과 짧은 자외선도 넓은 의미에서 빛의 범주에 속한다. 따라서 광학에서 다루게 되는 전자기파의 범위는

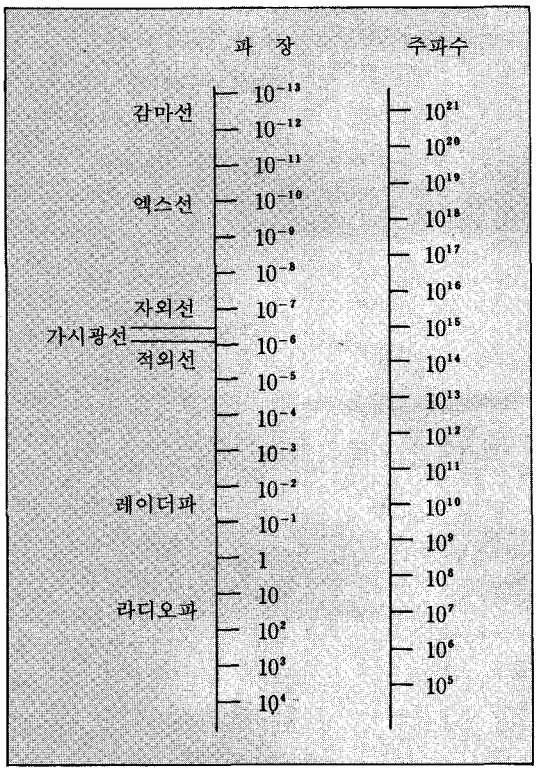


그림 1-2 전자기파의 스펙트럼과 가시광선

적외선, 가시광선, 자외선이 된다.

이런 세 가지 영역의 전자기파에 대해서 살펴보자. 가시광선이 사람의 눈에 들어오면 색감으로 느껴지게 되는 데, 파장에 따라서 각각 고유한 색으로서 느껴진다. 가시광선이 어떠한 색의 빛들로 이루워져 있는가는 무지개를 보면 알 수 있다. 즉, 무지개에 나타나는 색들은 가시광선이 단색광(monochromatic light)상태에서 나타내는 색들이다. 빛의 파장과 색과의 관계를 나타내 보면 그림 1-3과 같은 데, 이때에도 색과 색간의 경계는 그다지 명확한 것이 아니다. 실제 사람의 눈에 보이는 파장의 범위는 사람마다 조금씩 다르지만 400nm에서 700nm에 이르는 범위의 빛이 가시광으로서 취급되는 수가 많다.

그림 1-3에서 보듯이 적외선은 적색의 바깥쪽에 있으므로 적외선이라 하며 눈에는 보이지 않지만 열로서 느껴지게 된다. 최근에는 이러한 적외선을 군사적인 목적의 열상장비(熱像裝備,

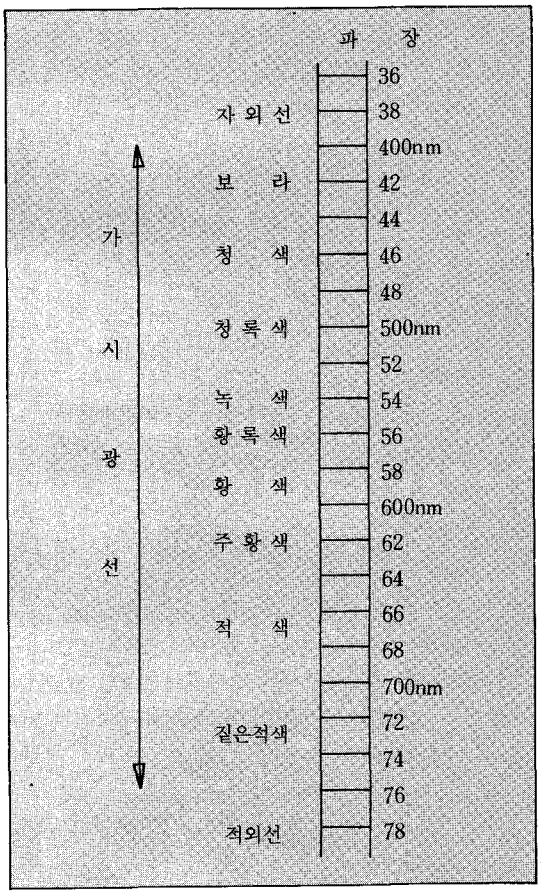


그림 1-3 가시광선의 스펙트럼

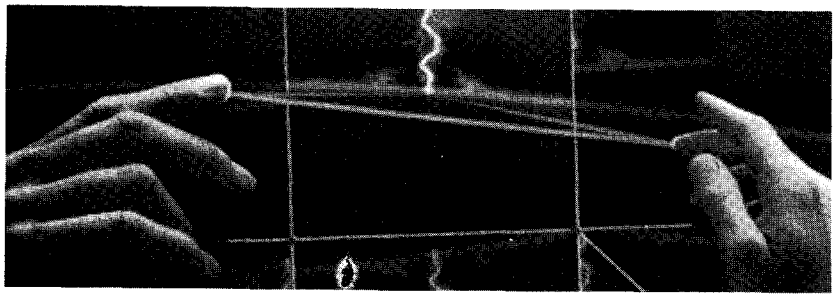
thermal imaging sytem)나 의료진단용으로 이용하고 있다. 한편, 자외선은 자색(紫色)의 바깥쪽에 있으므로 자외선이라 한다. 자외선은 파장이 짧아 갖고 있는 에너지가 크므로 화학반응을 촉진시키는 역할을 한다. 해변가에서 살갗이 탄다든지 햇빛을 오래 받은 책 등이 변색하다든지 하는 것은 바로 이 자외선에 의한 것이다.

자외선의 경우는 대부분의 필름을 감광시키지만 적외선은 에너지가 작으므로 적외선용의 특수한 필름만을 감광시킬 수 있다.

2. 빛의 성질

2.1 직 진

빛이 파동의 성질을 가지고는 있지만 파장이



워낙 짧기 때문에 보통의 경우에는 파동으로서의 성질을 나타내지 않고, 마치 입자와 같은 성질을 보이게 된다. 그 결과 빛은 곧바로 나아가는 성질, 즉, 직진성을 가지게 된다. 이러한 사실의 증거로는 그림자의 가장자리가 선명하게 구분된다는 점, 달 또는 지구의 그림자에 의한 일식, 월식현상 등을 들 수 있다.

이러한 빛의 직진성을 가장 간단한 광학기기의 하나인 바늘구멍 사진기를 예로 들어 설명해 보자. 바늘구멍 사진기는 그림 2-1과 같이 암실을 이루는 통과 거기에 뚫어 있는 바늘구멍으로 이루어진다. 물체로부터 나오거나 반사된 빛은 사방으로 퍼져 나가게 되는데, 이러한 빛 중에서 바늘구멍으로 향한 빛만이 바늘구멍을 통과한 후 스크린 위에 상을 맺게 한다. 이때 맺힌 상은 상하좌우가 뒤바뀌게 된다. 바늘구멍의 크기가 상의 선명도를 좌우하게 되므로 가급적 작게 해주는 것이 좋지만 너무 작게 해주면 상에 도달하는 빛의 양이 작게 되기 때문에 만족스러운 노출을 얻기 위해서는 장시간 노출을 해야

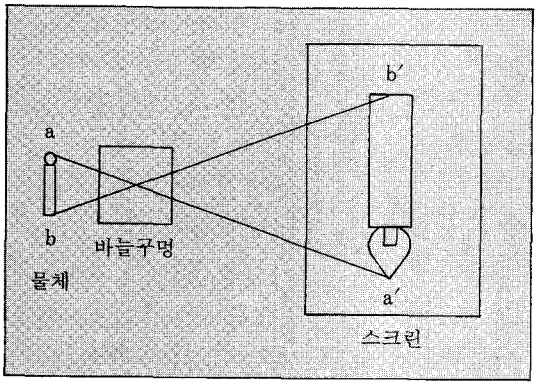


그림 2-1 바늘구멍 사진기의 원리

하고 나중에 언급하게 될 회절현상에 의해 오히려 상이 번지게 되므로 적절한 크기의 바늘구멍을 뚫어 주어야 한다. 대략 0.1mm 정도의 직경을 갖는 바늘구멍을 사용하면 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다.

이 사진기는 빛의 직진만을 이용하므로 물체까지의 거리에 관계없이 선명한 사진을 얻을 수 있는 이른바 무한대의 피사체심도를 가지며, 상이 휘어져 나타나는 왜곡(歪曲 : distortion)이 나타나지 않는다는 장점을 가진다.

상의 크기는 스크린과 바늘구멍 사이의 간격에 의해서 결정된다. 즉, 스크린을 바늘구멍에 가깝게 해주면 상의 크기가 작아지고, 반대로 멀리 해주면 상이 커지게 된다. 이 사진기의 촬영대상은 노출시간이 상당히 길어야 하는 문제점 때문에 오랫동안 정지해 있는 물체로 제한되므로 한적한 곳의 건물, 풍경이나 정물들이 주로 촬영된다.

2.2 간 섭

간섭이란 파동과 파동이 상호작용하여 그 세기가 더욱 세지거나 반대로 약해지는 현상으로 파동에 있어서 보편적으로 나타나는 현상이다. 이러한 간섭현상은 파장이 길수록 쉽게 일어나는 데, 가시광의 경우에는 파장이 비교적 짧기 때문에 특별한 경우에만 간섭현상을 볼수 있게 되며, 빛이 때로는 입자로, 때로는 파동으로 취급되는 이유가 여기에 있다.

그림 1-1과 같이 나타내지는 동일한 파장의 두 빛이 있다고 할 때 두 광파(光波)의 산과 산, 골과 골이 일치하면 빛의 밝기가 더욱 밝아지며, 반대로 산과 골, 골과 산이 만나면 빛의 밝기가

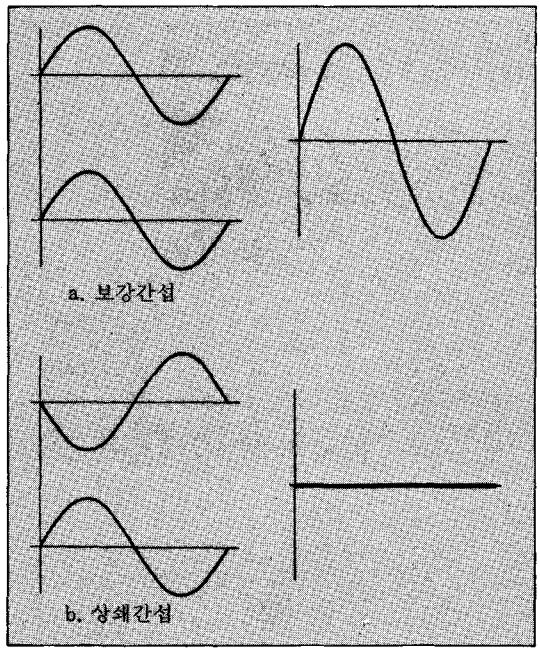


그림 2-2 간섭의 원리

더욱 어두워진다. 이러한 간섭현상은 그림 2-2에 보인 바와 같다. 이러한 간섭의 결과는 공간적으로 밝고 어두운 일련의 무늬로서 나타나게 된다.

이와 같이 광파와 간섭을 일으키기 위해서는 두 광파가 반드시 같은 광원에서 나와야 한다. 즉, 한 광원에서 나온 빛의 파면을 나눠주거나 (그림 2-2의 (a)), 반거울(half mirror) 등을 이용하여 진폭을 나눠주므로써(그림 2-3의 (b)) 서로 간섭을 일으킬 수 있는 두 광파를 얻게 된다. 이와 같이 광파간에 간섭을 일으킬 수 있는 성질을 간섭성이라 하는 데, 간섭성에는 공간간섭성(spatial coherency)과 시간간섭성(temporal coherency)이 있다.

우리의 주변에서 흔히 볼 수 있는 간섭현상으로는 비누방울의 표면에 생기는 오색무늬, 모기장과 모기장을 겹쳤을 때 생기는 무늬 등을 들 수 있다. 한편, 광학회사에서는 유전체 박막증착을 통해 표면반사를 줄인다든가, 원기를 사용하여 뉴우튼 링의 무늬수를 헤아려 가공된 면의 현상을 측정하는 데 간섭현상을 이용하고 있다.

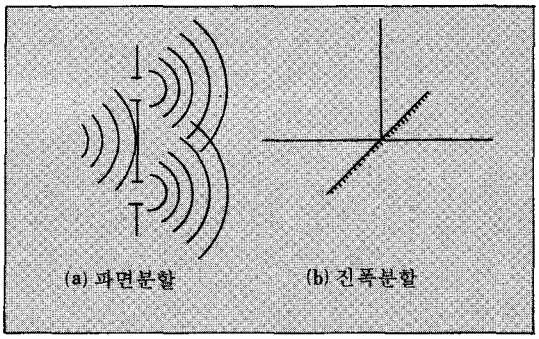


그림 2-3 파면 분할과 진폭분할

2.3 회절

회절 역시 파동에서 일반적으로 일어나는 현상이다. 불투명한 장애물의 날카로운 개구(開口 : aperture)를 지나가게 되는 평행광(일반적으로 무한대의 위치에 있는 물체로부터 오는 빛은 근사적으로는 평행광이라 볼 수 있다)은 그 날카로운 가장자리에서 새로운 파동을 형성하게 된다. 이때, 새로 생긴파동이 원래의 평행광과 간섭을 일으킬 수 있으면 개구를 지난 후에 간섭효과를 나타내게 되는 데, 이러한 개구에 의한 효과를 회절효과라 한다. 이러한 현상에 의해서 빛의 직진만으로는 설명할 수 없는 곳에도 빛이 도달하는 효과가 나타난다. 통상적인 물체에서는 이러한 회절효과가 미미하여 잘 나타나지 않지만 그 가장자리의 두께가 빛의 파장과 비교될 수 있을 정도로 날카로운 경우에는 그 효과가 현저해진다.

이러한 회절현상은 한정된 개구면적을 갖는 모든 광학계의 상에서 빛의 퍼짐을 초래하게 되는 데, 이 퍼짐의 크기와 빛의 강도분포는 개구의 형상과 크기, 사용되는 빛의 파장에 따라 달라지게 된다. 만일 개구의 형태가 원형이라면 (이러한 과정은 광학계의 대부분이 원형의 개구를 갖고 있으므로 적절한 가정이라 할 수 있다), 동심원 형태의 밝고 어두운 회절무늬가 나타나는 데 첫번째 어두운 무늬(이것을 아이리 디스크(Airy disk)라 한다)의 반경을 r_0라 하고 개구의 직경을 D라 하면 이들간에는 다음의 관계식이 성립한다.

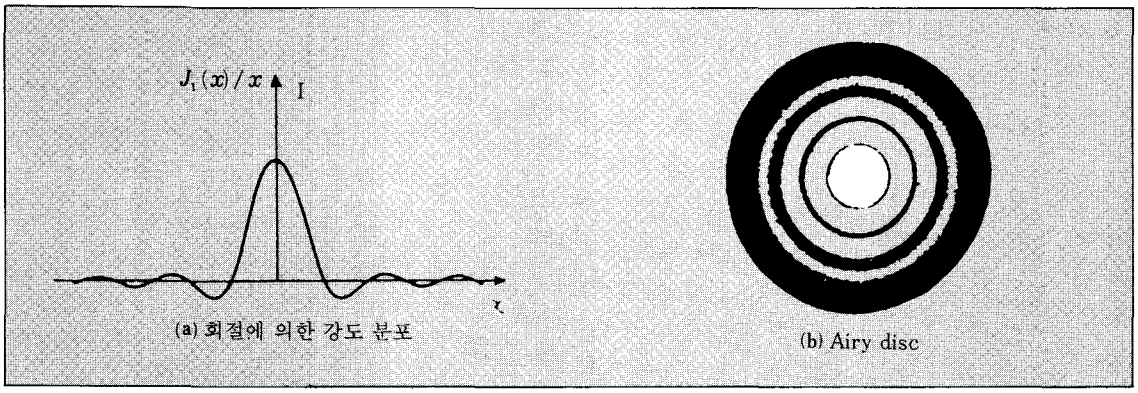


그림 2-4 회절에 의한 강도 분포와 Airy disc.

$$\theta=\frac{1.22\lambda}{D} \qquad (2-1)$$

이때 θ는 개구에서 아이리 디르크를 바라다 보았을 때 아이리 디스크가 만드는 각도의 절반을 라디안(radian)을 단위로 하여 나타낸 값이며, λ는 이때 사용된 빛의 파장이다. 만약 물체가 무한대의 거리에 있는 경우라면

$$\theta=\frac{r_0}{f} \qquad (2-2)$$

이므로 식 (2-1)과 (2-2)에서 r_0의 값은

$$r_0=1.22\frac{f}{D}\lambda \qquad (2-3)$$

가 된다. 이때 f/D는 그 렌즈의 밝기를 나타내는 F넘버이므로, 이 식을 다시 써주면,

$$r_0=1.22F\lambda \qquad (2-4)$$

가 된다. 또한, 정사각형 모양의 개구에서는 그 한 변의 길이를 a라 하면 아때의 첫번째 어두운 무늬가 이루는 각도는

$$\theta=\frac{\lambda}{a} \qquad (2-5)$$

가 된다.

이러한 회절현상은 완전한 렌즈(perfect lens : 뒤에 말하게 될 수차가 전혀 없는 렌즈)의 분해능에 그 한계를 제시하게 된다. 이와 같은 렌즈계를 회절에 의해 성능이 제한되는 렌즈계(diffraction limited system)라고 한다. 원형의 개구를 갖는 완전한 렌즈계에서는 분해한계를 근접한 두 점의 상들에서 한 점의 중심이 다른 한 점의 아이리 디스크위에 놓일 때 이 두 점간의 거리라고 정의한다. 또 이 거리의 역수를 취해 이것을 분해능(RP : resolving power)이라 한다. 이때의 관계식은

$$RP=\frac{1}{1.22F\lambda}=\frac{D}{1.22f\lambda} \qquad (2-6)$$

로 주어진다. 이 식에서 볼 수 있듯이 분해능은 파장 λ가 짧을수록, 개구의 직경 D가 클수록 높아진다.

빛이 그 파장보다 작은 미립자에 부딪히면 원래의 진행방향과는 상관이 없는 여러 방향으로 흩어지게 된다. 이러한 현상을 산란이라고 한다. 산란은 파장이 짧은 파란 빛이 대기 중에 떠있는 공기분자에 의해 산란되기 때문에 하늘이 파랗게 보이게 된다. 반면에 석양이 붉게 보이는 것은 파장이 짧은 푸른 빛이 산란에 의해 흩어지고 파장이 긴 붉은 색은 회절이 잘 되므로 빨간 빛이 휘어져 붉게 보이게 된다.

또한, 안개는 공기 중에 있는 물방울에 의해 빛이 산란되므로 시야를 가리게 된다. 이때, 안개가 희게 느껴지는 것은 물방울의 크기가 비교적 크기 때문에 가시광이 거의 모든 파장에서 산란을 일으키기 때문이다.

한편, 표면이 거친 물체의 표면에서 일어나는 난반사의 경우에는 빛의 경로가 여러방향으로 흩어진다는 점에서는 유사하지만 파장에 관계없이 일어난다는 점에서 산란과는 다르다.

〈계 속〉