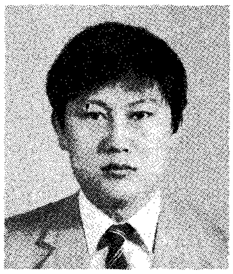
연재 I

광학개론 (5)

〈구면에서의 반사〉



삼양광학공업주식회사
부설연구소 정해빈

6. 구면에서의 반사

현재 사용되고 있는 광학계의 면은 대부분 구면으로 이루어져 있다. 우리가 앞장에서 다룬 평면도 곡률반경은 무한대인 구면이라 볼 수 있다. 이와 같이 구면이 광학계에 널리 쓰이고 있는 것은 다른 어떤 곡면(예를 들어 포물면, 타원면, 쌍곡면 등)보다도 제작이 쉽다는데 그 원인이 있다. 구면은 무수히 많은 회전 대칭축을 갖고 있기 때문에 가공 작업시 임의의 회전 대칭축을 그 중심축으로 잡을 수 있어 가공이 손쉽다. 여기에서는 이러한 구면에서의 반사문제를 다뤄 보도록 하겠다.

구면경은 구면의 일부에 반사막(통상적으로는 금, 은, 알미늄 등의 금속막을 입히고 그 위에 유전체막을 보호막으로 입힌다)을 입힌다. 이 반사막이 반사면의 구실을 하는 거울을 의미한다. 이러한 구면경에는 물체에 대해 오목한 면을 반사면으로 이용하는 오목거울과 볼록한 면을 반사면으로 이용하는 볼록거울이 있다. 오목거울은 반사된 빛을 한 곳으로 모아주는 역할을 하므로 볼록렌즈와 같은 구실을 하며, 볼록거울은 반대로 반사된 빛을 흩어지게 하는 역할을 하므로 오목렌즈와 같은 구실을 한다.

6.1 오목거울

그림 6-1에서 O를 오목거울의 정점(頂點), C를 이 구면의 중심, C와 O를 연결하는 선을 광축이라 부른다. 이제 광축과 평행을 이루는 광선 BP가 오목거울 위의 한 점 P에 입사하여 그 점에서 반사한다고 할 때 반사후 광축과 만나는 점을 F라 하자. 점 P에서 오목거울면의 법선을 그으면 직선 CP가 될 것이다. 그림에서와 같이 광축에 평행한 광선이 반사후 광축과 만나는 점을 정의(定義)에 의해 초점이라 하고, 정점에서 초점까지의 거리를 초점거리라 한다. 초점거리를 f, 구면경의 곡률반경을 r이라 할 때 f와 r간의 관계식을 구해보면 다음과 같다.

반사의 법칙으로부터 각 BPC와 각 FPC는 서로 같다. 또, 평행선의 엇각으로 각 BPC와 각 PCO가 같고, 각 BPF와 각 PFO가 같으므로,

$$\angle PFO = \angle BPC + \angle FPC = 2(\angle BPC) = 2(\angle PCO) \quad (6\text{-}1)$$

이때,

$$\angle PCO=\frac{h}{r},\ \angle PFO=\frac{h}{f}\text{[1]} \qquad (6\text{-}2)$$

이므로 이것을 (6-1)식에 대입하면,

$$\frac{h}{f}=2\frac{h}{r}$$

$$f=\frac{1}{2}r$$

이 된다. 즉, 오목거울의 초점거리는 그 곡률반경의 절반이 됨을 알 수 있다.

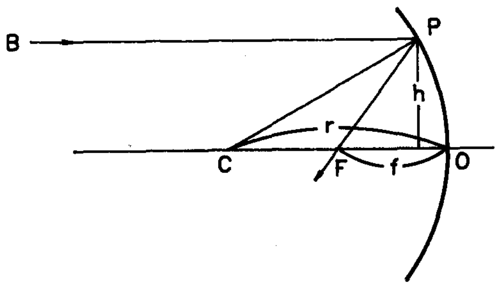


그림 6-1 오목거울

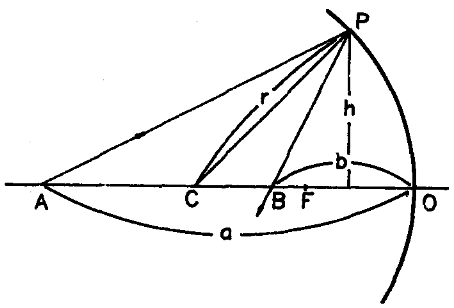


그림 6-2 오목거울에 의한 유한거리 물체의 결상

앞에서 구한 곡률반경 r과 초점거리 f사이의 관계식은 물체가 무한대에 있을 때의 물체와 상간의 관계식이라 할 수 있다. 이제 물체가 유한한 거리 a에 놓여 있는 경우의 물체거리 a, 상거리 b, 초점거리 f사이의 관계식을 구해보자.

그림 6-2에서 ∠APC=∠BPC이므로 ∠OPC와 ∠IPC를 다시 나타내주면,

$$\angle PBO-\angle PCO=\angle PCO-\angle PAO, \qquad (6\text{-}3)$$

$$\frac{h}{b}-\frac{h}{r}=\frac{h}{r}-\frac{h}{a} \qquad (6\text{-}4)$$

$$\frac{h}{a}+\frac{h}{b}=\frac{2h}{r} \qquad (6\text{-}5)$$

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f} \qquad (6\text{-}6)$$

이 된다.

6.2 볼록거울

그림 6-3에서 볼록거울의 중심을 C로 하고 광축 CD에 평행하게 광선이 들어오는 경우를 생각해보자. 이때 반사광 PB는 그 연장선이 F를 지나게 된다.

오목거울에서와 마찬가지로 초점거리를 f, 구면경의 곡률반경을 r이라 할 때 f와 r간의 관계식을 구해보면 다음과 같다.

반사의 법칙으로부터 각 APN과 각 BPN은 서로 같다. 즉,

$$\angle APN=\angle BPN \qquad (6\text{-}7)$$

또한, 평행선의 엇각은 서로 같으므로

$$\angle APN=\angle OCP \qquad (6\text{-}8)$$

$$\angle APB=\angle OFP \qquad (6\text{-}9)$$

이 되며,

$$\angle APB=\frac{1}{2}\angle APN \qquad (6\text{-}10)$$

이므로,

$$\angle OFP=\frac{1}{2}\angle OCP \qquad (6\text{-}11)$$

이다. 이때,

$$\angle OFP=\frac{h}{f} \qquad (6\text{-}12)$$

$$\angle OCP=\frac{h}{r} \qquad (6\text{-}13)$$

따라서

$$\frac{h}{f}=\frac{2h}{r} \qquad (6\text{-}14)$$

이므로,

$$f=\frac{r}{2} \qquad (6\text{-}15)$$

이 된다. 이 결과는 오목거울의 경우와 같다. 이때 부호에 대해서는 나중에 다시 자세히 다루게

되겠지만 상이 생기는 방향이 정점을 기준으로 할 때 반대가 되므로 부호는 서로 반대가 된다.

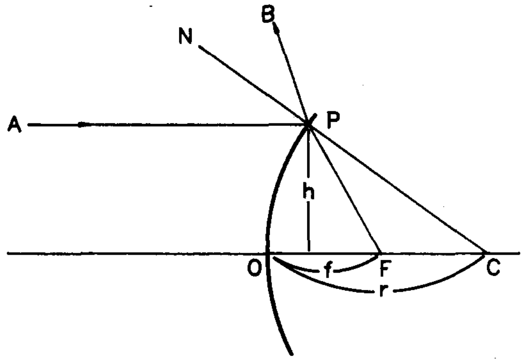


그림 6-3 볼록거울

6.3 작도법

구면경 문제에서 작도에 의해 상점을 구하는 데는 다음의 3가지 광선이 이용된다.

(i) 광축에 평행하게 들어온 광선은 반사면에서 반사한 후 초점을 지나가게 된다.

(ii) 구면의 중심을 지나서 반사면에 입사한 빛은 반사후 동일한 경로로 되돌아 나가게 된다.

(iii) 초점을 지나 반사면에 입사한 빛은 반사한 후 광축에 평행하게 나가게 된다.

(i)은 제2초점의 정의 그 자체이며, (ii)는 구면의 중심을 지나는 직선은 결국 그 구면의 법선이 되며 이와 같은 경로를 갖는 광선에 대해서는 입사각과 반사각이 모두 0도가 되어 결국 원래의 방향으로 되돌아감을 의미하고, (iii)은 제1초점의 정의 그 자체이다. 이상의 원칙을 오목거울에 적용시켜보면 그림 6-4와 같다.

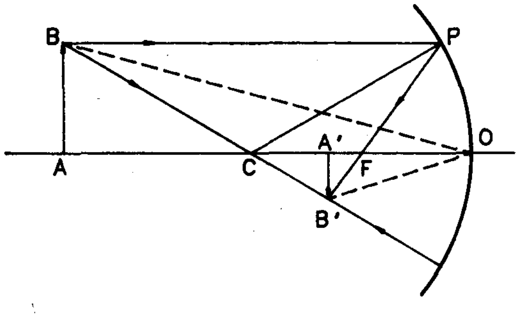


그림 6-4 오목거울에서의 작도법

오목거울의 광축에 수직하게 물체 AB가 놓여 있다고 하면 B에서 광축에 평행하게 나온 빛은 반사면 위의 점 P에서 반사한 후 초점 F를 지나간다. 또, 점 B에서 나와 구의 중심 C를 지나서 반사면에 입사한 빛은 반사후 동일한 경로로 되돌아 나오게 된다. 따라서 이 두 광선의 교점 B′가 B의 상점이 된다. 이와 같이 상점은 위에서 말한 3가지 광선 중 2가지 광선만 가지면 결정될 수 있다. B′에서 광축에 수선 B′A′를 그으면 A′B′가 물체 AB의 상점이 된다. 물론 B에서 나와 초점 F를 지나는 빛 BF는 반사후에 광축에 평행하게 반사되면서 상점 B′를 지나게 된다. 물론 이때의 B′점에는 빛이 모이게 되므로 실상이 형성된다.

볼록거울에 대해서 적용시켜보면 그림 6-5와 같다.

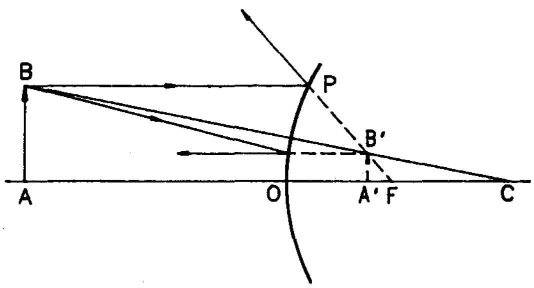


그림 6-5 볼록거울에서의 작도법

볼록거울 앞의 광축에 수직하게 물체 AB가 놓여 있다고 하면 B에서 광축에 평행하게 나온 빛은 반사면 위의 점 P에서 반사된 후 마치 초점 F에서 나오는 것처럼 나가게 된다. 또, B에서 나와 구의 중심 C를 향해 반사면에서 입사한 빛은 반사후 되돌아 나오게 된다. 이 두 광선의 연장선이 점 B′에서 만난다고 할 때, 이 B′가 B의 상점이 된다. 이 B′에는 실제로 빛이 모이게 되는 것은 아니고, 마치 이 점에서 빛이 나오는 것처럼 보이므로 허상이라 한다. 이때에도 초점 F를 향해 입사한 빛은 반사후 광축에 평행하게 나가게 되며, 그 연장선은 앞서의 두 광선의 연장선과 상점에서 만나게 된다. 상점 B′에서 광축에 내린 수선 A′B′가 AB의 상이 된다.

6.4 실상과 허상, 정립상과 도립상

그림 6-4에서와 같이 반사된 빛이 실제로 모여서 형성되는 상을 실상(實像;real image)이라 한다. 이때, 물체 AB와 상 A'B'가 서로 반대 방향으로 존재하게 되므로 이러한 상을 도립상(倒立像)이라 한다. 이 두가지 말을 결합하여 도립실상이라 부른다. 반면에 그림 6-5에서와 같이 빛이 실제로 모이지 않고, 다만 그 연장선들만이 마치 그 점에서 빛이 나오는 것처럼 보이게 되는 상을 허상(虛像;virtual image)이라고 한다. 이때에는 물체와 상의 방향이 서로 일치하게 되므로 정립상(正立像)이라 한다. 이 두가지 말을 결합하여 정립허상이라 부른다.

거울의 종류와 물체거리에 따라 생기는 상의 종류는 다음과 같다.

(i) 오목거울

① 물체가 무한거리에 있을 때, 상은 초점위치에 생긴다(도립실상).

② 물체가 무한거리와 C사이에 있을 때, 상은 C와 F사이에 생기며, 상은 물체보다 작다(도립실상)

③ C(=2f)에 있을 때, 상도 C의 위치에 생기며 상과 물체의 크기는 같다(도립실상).

④ C와 F사이에 있을 때, 상은 C보다도 거울에서 먼 곳에 생기며 상의 크기가 물체보다 크다(도립실상).

⑤ F의 위치에 있을 때, 상은 무한원(無限遠)에 생긴다. 이때 상의 크기는 무한대(無限大)가 된다.

⑥ F와 O의 사이에 있을 때, 상은 오목거울의 뒤에 생기며, 상의 크기가 물체보다 크다(정립허상).

(ii) 볼록거울

물체의 위치에 상관없이 상은 거울뒤에 생기며, 상의 크기는 물체보다 작게 되고 정립허상이 된다.

6.5 구면경의 용도

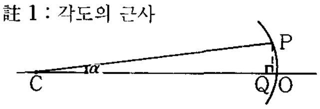
오목거울의 경우는 빛을 모으는 성질이 있으므로 주로 집광경(集光鏡)으로 사용된다. 이때에는 그 결상능력을 사용하는 것이 아니고, 집광력만을 사용하므로 면의 형상이 정밀할 필요는 없다. 의사들이 진찰시에 사용하는 반사경, 랜턴 등의 반사경, 헤드라이트의 반사경, 올림픽 성화 채화시 보여준 채화경 등이 이러한 개념에서 사용되고 있는 예이다. 반면에 결상능력을 이용한 예로서는 여러개의 구면경을 모아서 거대한 하나의 일차 반사경을 만드는 segmented mirror, 반도체의 리소그라피(lithography)에 사용되는 동심구면경 시스템 등의 예가 있다.

오목거울의 경우에는 평면경보다 시야가 넓어지는 것을 이용하여 주로 뒷방향을 살피는데 이용한다. 자동차의 후시경, 커브길의 모퉁이에 설치된 스테인레스제의 반사경 등은 이러한 원리를 이용하고 있다.

6.6 그밖의 거울들

구면경은 그 제작이 쉽기 때문에 널리 쓰이고는 있지만 구면경만으로는 구면수차와 코마(구면수차와 코마에 대해서는 나중에 자세히 다루게 된다)의 보정이 어렵기 때문에 포물면경, 쌍곡면경, 타원면경 등의 다양한 곡면 형상의 반사경만이 고안되어 있다. 이와 같이 구면이 아닌 면을 모두 통틀어서 비구면(非救面)이라 하는데, 비구면은 구면보다 많은 설계상의 자유도를 갖게 되므로 적은 수의 광학소자로도 수차보정이 용이하다는 장점이 있다. 하지만 그 제작은 대칭축이 하나밖에 없어서 매우 어렵기 때문에 천체 망원경, 분광광도계 등의 극히 제한된 분야에서만 사용되고 있다.

註 1 : 각도의 근사



라디안으로 각을 나타낼 때에는 그 정의에 의하면,

$\angle\alpha=\frac{\overset{\frown}{PD}}{\overline{CO}}$ 이지만 각도 α가 작을 경우에는 $\overline{PD}\cong\overset{\frown}{PO}$이므로 $\angle\alpha\cong\frac{\overline{PO}}{\overline{CO}}$가 된다.또 이때 $\overline{PO}\cong\overline{PQ}$ 이므로 $\angle\alpha\cong\frac{\overline{PQ}}{\overline{CO}}$ 로 나타낼 수 있다.