

# [ 첨단광학기술 활용을 위한 광학부품의 사용방법과 유의점 ⑮ ]

광학세계에서는 일본 캐논의 연구개발부장을 지낸 末田哲夫씨가 집필한 <광학부품의 사용법과 유의점>이란 책 내용을 연재하고 있다. 본 내용은 일본의 월간 OPTRONICS에서 1982년부터 30회에 걸쳐 연재된 바 있고, 연재한 내용만 묶어 한 권의 책으로 나온 이후 지금까지 많은 광학인들이 애독하고 있는 핸드북이다. 월간 OPTRONICS는 1990년에 책 내용을 세부에 걸쳐 수정함과 동시에 렌즈에 대한 기초를 보다 충실히 하고 비구면 렌즈, Rod 렌즈, 홀로그램, 고체 촬상디바이스, 회절공간섭방식 엔코더 등을 새롭게 첨가하여 보다 알찬 내용으로 보강하여 증보개정판을 내놓았다.

국내에서는 (주)그린광학에서 본 자료를 입수하여 사내자료로 활용하고 있을만큼 시대와 장소를 초월하여 아직도 광학산업현장에서 유용한 자료로 읽혀지고 있다. 비록 일부 내용들은 우리나라 산업현실과 다소 차이가 있는 부분도 있을 것이나 광학기술의 역사와 기반이 앞서있다고 생각되는 일본의 실질적인 기술관련 자료이기 때문에 국내 업체 관련분야에 종사하시는 분들에게 일독을 권해드리고 싶은 마음에 광학세계에서도 2009년 7월호부터 연재를 하게 되었다.

전체 내용을 살펴보면, 제1부에는 대표적인 광학부품에 대한 설명, 제2부에는 그것들을 사용한 광학시스템과 그것들에 관한 기본적인 사항의 해설, 제3부에는 광학부품을 수입하는 경우의 측정방법과 그것들을 시스템으로 조립하는 경우의 조정방법 예 등을 소개했다. 기술내용은 응용범위가 넓다고 생각되는 구체적인 예를 기본으로 소개했다.

〈편집자 주〉

## 연재 순서

### 제1부 광학부품의 종류와 사용방법

- 제1장 평면을 베이스로 한 광학부품
- 제2장 구면을 베이스로 한 광학부품
- 제3장 다양한 광학부품

### 제2부 광학시스템과 광학부품

- ▶ 제1장 광학시스템의 빛의 포착방법과 기능

### 제2장 광학시스템과 광학부품

### 제3부 광학부품의 검사와 시스템으로의 조립·조정

- 제1장 광학부품의 검사·측정
- 제2장 광학부품의 조립조정

## 저지약력: 末田哲夫

1947년 5월 25일생  
1971년 東京理科大学 이학부 물리학과 졸업  
1973년 同수학과장 수료  
1973년 캐논(주) 입사

각종 광학계에 관한 계속 물리광학을 주제로 한 계속방법과 화상처리에 관한 연구개발 등에 종사, 현재 연구개발본부 G-CDS추진부 부장

<지난호에 이어서>

### 3. 光강도 및 색채 표현

빛을 에너지로서 활용하는 광학시스템은 그림2.82에 나타난 동작을 이룬다. 시스템으로서 생각한 경우에는 능동적으로 빛을 취급하는 것과 수동적으로 취급하는 것을 생각할 수 있다.

능동적으로 光강도를 취급하는 시스템은 광원을 있는 것으로 해서, 조명시스템과 미소스폿의 작성시스템 등이 이것에 해당한다. 조명시스템은 그랜드(grand)와 실내에 설치하는 소위 “조명설비”에 상당하는 것에서부터, 사진기의 원고조명장치와 위(胃)카메라의 조명, 안저(眼底)카메라의 조명이라고 하는 각종 장치내 조명을 생각할 수 있다. 미소스폿의 작성은 레이저메스와 레이저가공 등, 열spot 작성에 의한 光刃物을 구성하는 경우와 레이저빔프린터와 光정보처리를 위한 레이저 빛을 강도변조·주사하는 경우가 있다. 또 광통신을 위해 빛을 변조해서 광파이버에 주입하는 경우 등도 있다.

수동적으로 光강도를 취급하는 시스템으로는 감광체를 가진 것이 있다. 예를 들면 태양광에 의해 발전을 행하는 솔라시스템과 조도계, 휘도계, 색채계 등이 대표적인 것이다.

광학시스템의 光강도를 취급하는 경우는 앞서 소개한 것과 같은 순전히 光강도를 목적으로 하는 것뿐만 아니라, 모든 광학시스템은 빛의 형태로 光강도와 관계가 있다. 광원에 관한 구성열 등은 이전도 설명을 한 바 있다. 또 光강도에 관계하는 시스템의 부품과 배치는 기본적으로 화상을 대상으로 하는 시스템의 경우와 거의 동등하다.

그래서 여기서는 光강도와 색채에 관한 표현방법(측광·측색)을 중심으로 설명하겠다.

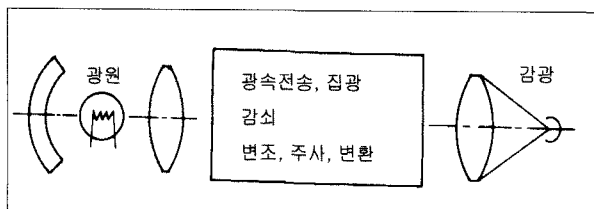


그림2.82 광을 강도로서 기능하는 시스템

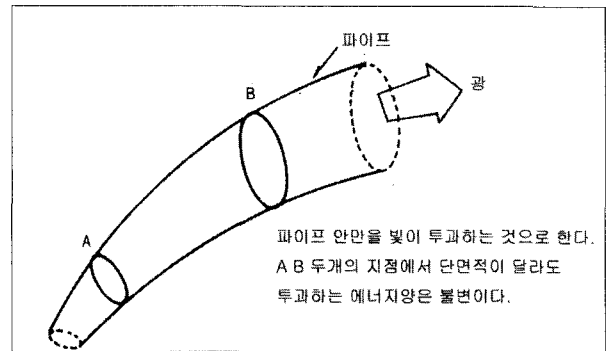


그림2.83 방사속

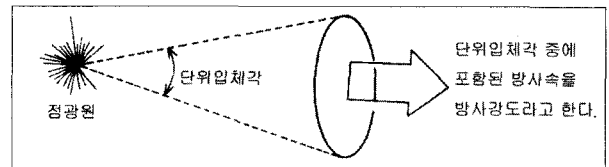


그림2.84 방사속

#### 3.1 光강도 표현방법

光강도를 표현하는 방법은 빛을 전자파의 흐름으로 취급하는 소위 “방사량”과, 인간의 눈을 기본으로 밝기를 취급하는 “측광량”으로 크게 나뉜다. 즉 인간을 대상으로 한 조명장치 등에 있어서는 光강도를 인간의 눈의 파장에 의한 감도 차이를 고려한 측광량을 사용한 쪽이 편리하다. 또 빛의 광도는 광원 등의 휘도를 표현하는 방법과 물체표면 등을 조명하는 빛의 조도 등의 방법이 있고, 다양한 경우에 맞춰 최적인 표현방법을 선택하게 된다.

##### (1) 광의 방사량

광의 방사량은 빛을 전자파 에너지의 흐름으로 생각하

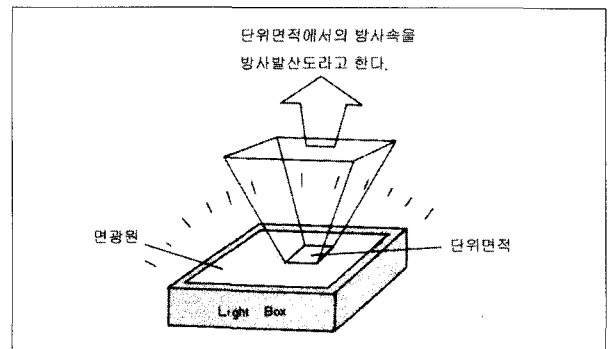


그림2.85 방사발산도

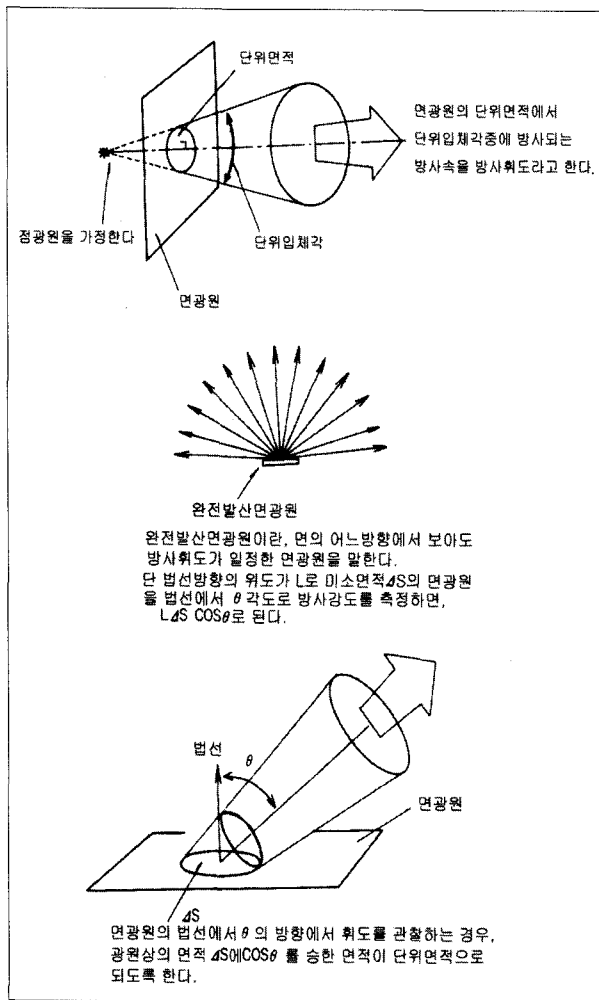


그림2.86 방사휘도

기 때문에 기본적인 단위는 와트(Watt) 혹은 줄(Joule)로 된다.

방사속(放射速)은 광원에서 유출하는 광에너지의 단위 시간 내에서의 총합을 의미하고, 단위로서 와트를 사용한다. 광원형태가 점광원과 면광원의 모든 총합을 의미한다. 에너지 불변의 법칙이 있기 때문에 예를 들면 그림2.83에 나타난 관내만을 빛이 통과하는 것으로 해서 A장소와 B장소에서는 그 단면이 달라도 방사속은 동일하다.

방사속만에서는 광원의 성질을 말할 수 없기 때문에 방사강도, 방사발산도, 방사휘도 등의 제량(諸量)이 정의되고 있다. 방사강도란 점광원에 대한 밝기를 의미하며 점광원에서의 단위입체각에 방사되는 에너지양을 나타낸다. 단위는 Watt/Steradian을 사용한다(그림 2.84). 방사발산도란 면적을 가진 광원에 대한 표현방

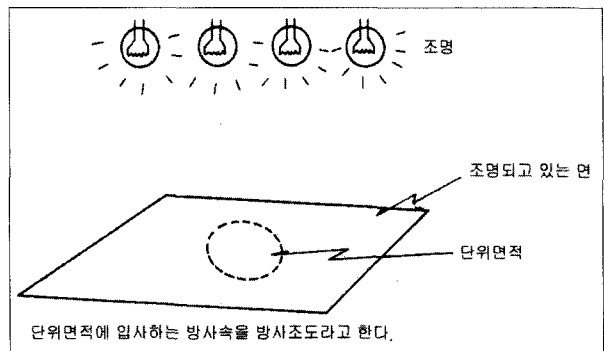


그림2.87 방사조도

법으로 광원의 단위면적당 방사에너지를 의미하고, 단위는  $\text{Watt}/\text{m}^2$ 이 된다(그림2.85). 방사휘도도 면적을 가진 광원에 대한 표현방법이고, 광원의 단위면적에서 단위입체각도 중에 방사되는 에너지를 의미하고, 단위는  $\text{Watt}/(\text{Steradian} \cdot \text{m}^2)$ 을 사용한다(그림2.86). 광원의 강도에 관한 사양으로서는 방사속의 방사휘도에 대해서 특히 생각해야 한다.

방사조도란 조명되는 동체(動體)의 단위면적당 방사속을 의미하고, 단위는  $\text{Watt}/\text{m}^2$ 를 사용한다(그림2.87).

## (2) 측광량(測光量)

방사량은 光강도를 전자파에너지로서 생각하기 때문에 말하자면 물리학적인 양이다. 이것에 대해서 측광량이란 인간의 눈에 대해서 밝은지 어두운지를 나타내는 것과 같은, 말하자면 생리적인 빛의 강함이다. 즉 인간의 눈에 일정 에너지 빛을 쬐인 경우, 파장에 따라 밝기를 느끼는 방식이 다른데, 그것을 시감도라고 한다. 그리고 인간 눈의 동작방식으로서 밝을 때와 어두울 때에 주로 동작하는 시세포가 다르기 때문에 특성이 약간 다르다. 즉 어두운 경우의 시감도를 암소시, 밝은 경우의 시감도를 명소시, 그 중간의 밝기에 대해서 박명시라고 한다(그림2.88). 명소시와 암소시에 대한 시감도를 그림2.89에 나타냈다. 물론, 시감도는 개인에 따라 다르고, 같은 개인이라도 그때의 신체 상태에 따라 다르다. 이 때문에 국제조명위원회(CIE)에서는 다수 사람의 데이터를 평균해서 최대감도를 1로 하는 표준비 시감도  $V(\lambda)$ 를 정하고 있다(표2.2). 또 측광량과 방사량의 관계는 파장 555nm 단색에서 방사강도가 1  $\text{W}/\text{sr}$  빛을 표준비 시감도를 가진 사람이 느끼는 광도를 683candela(칸델라 cd)로 정하고 있다. 즉 분광분

포가  $P(\lambda)$  방사속을 눈으로 볼 때의 밝기(이것을 광속이라고 한다)는

$$I = 683 \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda$$

로 나타내고, 광속 단위로서 Lumen(루멘, lm)을 사용한다.

이상과 같은 식으로 측광량을 물리량에 대응시키면 다음과 같이 된다.

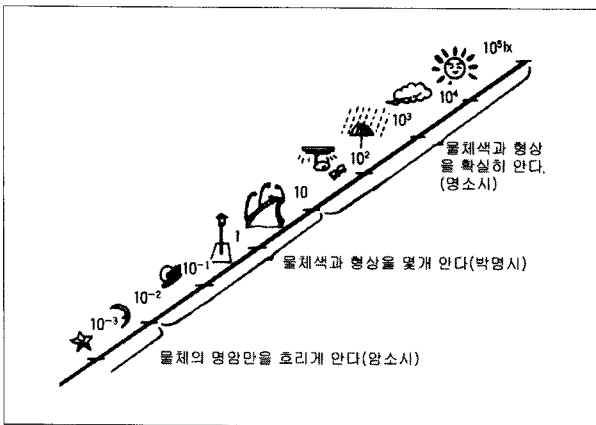


그림2.88 시각을 얻을 수 있는 밝기(조도)의 범위(조명학회, 1967)

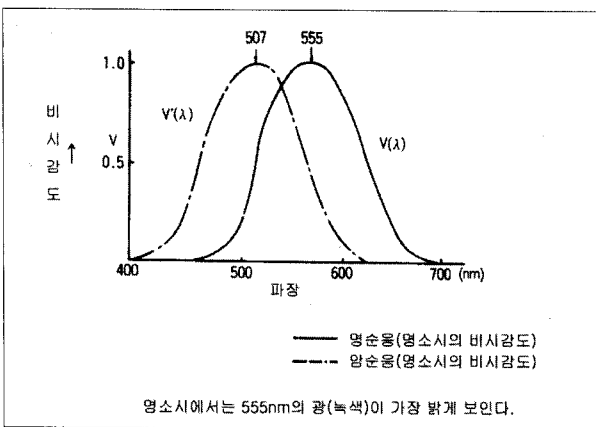


그림2.89 비시감도곡선

광원의 강도에 관계한 제량은 방사강도에 대응하는 측광량으로서 광도(cd), 방사발산도에 대응해서 광속발산도( $lm/m^2$ ), 방사휘도에 대응해서 휘도( $cd/m^2$ )가 있다. 또 방사조도에 대응해서 조도(Lux;룩스, lx)가 사용된다. 표2.3에 이상의 대응을 나타냈다.

휘도 단위는 ( $cd/m^2$ )가 현재 사용되지만, 종래는 매우 많은 단위가 사용되어, 카탈로그 등에는 현재도 사용

하고 있는 것도 있다. 그것들의 계산을 표2.4에 나타냈다.

조도 단위는 (lx)이지만, 이것은 ( $lm/m^2$ )와 동일하다. 조도도 종래에서 사용되어 온 단위가 다양하고, 그 계산은 다음과 같이 말할 수 있다.

$$1 \text{ phot[ph]} = 1 [lm/cm^2]$$

표2.2 비시감도

파 장	명순응 비시감도 V (λ)	암순응 비시감도 V' (λ)	파 장	명순응 비시감도 V (λ)	암순응 비시감도 V' (λ)
380	0.0000	0.000589	590	0.757	0.0655
390	0.0001	0.002209	600	0.631	0.03315
400	0.0004	0.00929	610	0.503	0.01593
410	0.0012	0.03484	620	0.381	0.00737
420	0.0040	0.0966	630	0.265	0.003335
430	0.0116	0.1998	640	0.175	0.001497
440	0.023	0.3281	650	0.107	0.000677
450	0.038	0.455	660	0.061	0.0003129
460	0.060	0.567	670	0.032	0.0001480
470	0.091	0.676	680	0.017	0.0000715
480	0.139	0.793	690	0.0082	0.00003533
490	0.208	0.904	700	0.0041	0.00001780
500	0.323	0.982	710	0.0021	0.00000914
510	0.503	0.997	720	0.00105	0.00000478
520	0.710	0.935	730	0.00052	0.000002546
530	0.862	0.811	740	0.00025	0.000001379
540	0.954	0.650	750	0.00012	0.000000760
550	0.995	0.481	760	0.00006	0.000000425
560	0.995	0.3288	770	0.00003	0.000000241
570	0.952	0.2076	780	0.000015	0.000000139
580	0.870	0.1212			

비고: 이 표는 Publication CIA No. 17(1970)에서 전제한 것이다.

$$1 \text{ miliphot[mph]} = 10^{-3}[\text{ph}]$$

$$1 \text{ meter-candle[m} \cdot \text{c]} = [lm/m^2] = 1[lx]$$

(1[cd]의 광원에서 1m 떨어진 조도를 표현한다)

$$1 \text{ foot-candle[f} \cdot \text{c]} = 1[lm/ft^2]$$

(3) 면광원에 의해 조명되는 휘도에 대해서

그림2.90에 나타난 배치에서, 같은 휘도B를 가진 면광원에 대한 점P의 조도E는 다음과 같이 된다. (결과만을 표시한다)

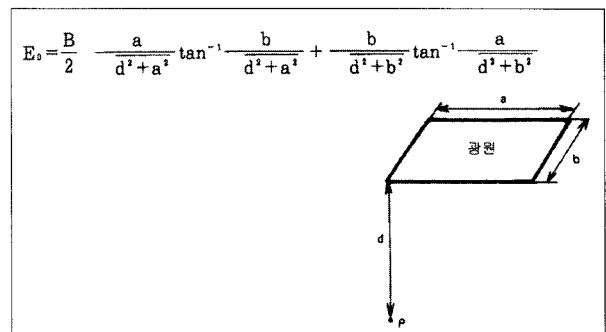


그림2.90

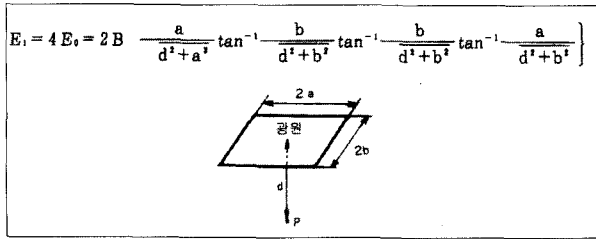


그림 2.91

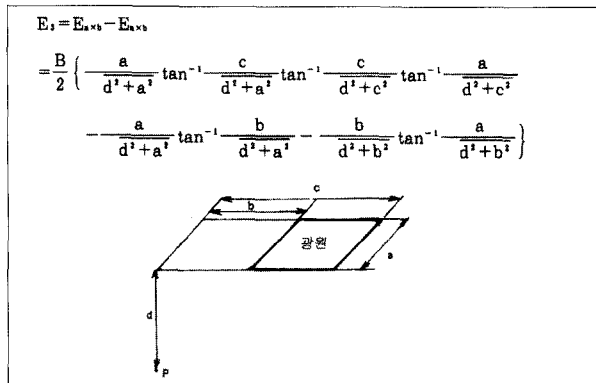


그림 2.92

표 2.3 방사량과 축광량

방사량(물리량)			축광량(인간에 대한 생리적인 양)				
방사량	기호	정의식	SI단위	축광량	기호	정의식	단위
방사에너지 radiant energy	$Q_r$		J	시각에너지 luminous energy	$Q_v$		$K Q_r$ , lm·s* (Talbot)
방사속 radiant flux radiant Power	$\Phi_r$	$\frac{dQ_r}{dt}$	W	광속 luminous flux	$\Phi_v$	$\frac{dQ_v}{dt}$	$K \Phi_r$ , lm
방사강도 radiant intensity	$I_r$	$\frac{d\Phi_r}{d\Omega}$	W/sr	광도 luminous intensity	$I_v$	$\frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	$K I_r$ , cd
방사발산도 radiant exitance	$M_r$	$\frac{d\Phi_r}{dS}$	W/m <sup>2</sup>	광속발산도 luminous exitance	$M_v$	$\frac{d\Phi_v}{dS}$	$K M_r$ , lm/m <sup>2</sup>
방사휘도 radiance	$L_r$	$\frac{dI_r}{dS}$	W/m <sup>2</sup> ·sr	휘도 luminance	$L_v$	$\frac{dI_v}{dS}$	$K L_r$ , cd/m <sup>2</sup>
방사조도 irradiance	$E_r$	$\frac{d\Phi_r}{dS}$	W/m <sup>2</sup>	조도 illuminance	$E_v$	$\frac{d\Phi_v}{dS}$	$K E_r$ , lx

비고: \*Talbot은 SI단위가 아니다. 사용하고 있는 기호는 1963년 ISO회의  
:lm은 lumen, cd는 candela, lx는 lux의 SI단위기호이다. \*에서 생략된 것이다.  
K : Km  
Km = 683 lumen/watt

예를 들면 그림 2.91과 같이 면광원의 중심 아래 점 P의 조도 E<sub>1</sub>은 광원의 2변의 길이를 2a2b로서 같은 식으로 그림 2.93과 같이 면광원에서 떨어진 위치에 대한 조도 E<sub>2</sub>는 a×c의 영역에서의 조도에서 a×b 영역의 조도를 뺀 값이 된다.

같은 식으로 그림 2.92와 같이 면광원에서 떨어진 위치에 대한 조도 E<sub>3</sub>는 a×c 영역에서의 조도에서 a×b 영역의 조도를 뺀 값이 된다.

#### (4) 결상렌즈의 상면조도

여기에서 결상렌즈에 의해 균일휘도를 가진 평면의 피사체 빛이 결상면상에 어느 정도 도달하는지를 간략하게 설명하겠다.

그림 2.93과 같이 광축상에 미소면적 ΔS의 피사체가 있고, 이것을 렌즈보다 결상배율(m)에서 결상하는 경우를 가정한다. 결상면상의 상면적을 ΔS', ΔS의 휘도를 L<sub>0</sub>, 물체거리를 l, 렌즈의 동경을 D, 렌즈의 투과율을 τ 로 한다. 렌즈를 통과해서 ΔS'로 향하는 광속 Φ'<sub>0</sub>는 ΔS 입체각을 고려하면,

$$\Phi'_0 = \tau L_0 \Delta S \pi D^2 / 4l^2$$

로 된다. 여기서 결상배율 m을 고려해서,

$$\Delta S' / \Delta S = m, l = f(1 + 1/m)$$

표 2.4 휘도의 환산표

	cd/cm <sup>2</sup> sb	cd/m <sup>2</sup> nt	asb eq. lx blondel	L eq. phot	cd/ft <sup>2</sup>	f. L. eq. f. c.
cd/cm <sup>2</sup> sb	1	10 <sup>4</sup>	π × 10 <sup>4</sup>	π	m × 10 <sup>4</sup>	π m × 10 <sup>4</sup>
cd/m <sup>2</sup> nt	10 <sup>-4</sup>	1	π	π × 10 <sup>-4</sup>	m	π m
asb eq. lx blondel	$\frac{1}{\pi} \times 10^{-4}$	$\frac{1}{\pi}$	1	10 <sup>-4</sup>	$\frac{m}{\pi}$	m
L eq. phot	$\frac{1}{\pi}$	$\frac{1}{\pi} \times 10^4$	10 <sup>4</sup>	1	$\frac{m}{\pi} \times 10^4$	m × 10 <sup>4</sup>
cd/ft <sup>2</sup>	$\frac{1}{m} \times 10^{-4}$	$\frac{1}{m}$	$\frac{\pi}{m}$	$\frac{\pi}{m} \times 10^{-4}$	1	π
f. L. eq. f. c.	$\frac{1}{\pi m} \times 10^{-4}$	$\frac{1}{\pi m}$	$\frac{1}{m}$	$\frac{1}{m} \times 10^{-4}$	1	1

(st) ; stild (f. L) ; foot-Lambert  
(nt) ; nit (eq. f. c) ; equivalent foot-candle  
(asb) ; astilb = equivalent lux = bondel m은 정수로 0.09290  
1 [nt] 가 1 (cd/m<sup>2</sup>) 이다.  
(L) ; Lambert = equivalent phot

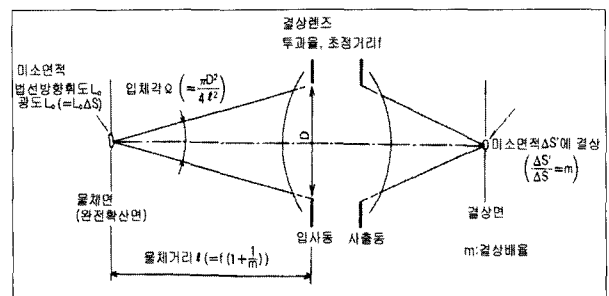


그림 2.93 렌즈의 광축상 결상

이기 때문에,

$$\Phi'_0 = \tau \pi L_0 (D/f)^2 \Delta S' / 4(1 + m)^2$$



로 된다. 따라서 광축상의 상점에 대한 조도  $E_0$ 는

$$E_0 = \Phi'_0 / \Delta S' = \left\{ \tau \pi L_0 (D/f)^2 \right\} / 4(1+m)^2 (1m/m^2) \quad (2.6)$$

로 된다. 이 결과는 광축상의 상면의 조도가 구경비 (FNo의 역수)의 2승에 비례하고, 배율m의  $(1+m)^2$ 에 역비례하는 것을 표현한다. 즉 FNo가 크게 되거나, 결상배율이 크게 되면 상면상의 조도가 어둡게 되는 것을 의미한다. 물체거리가 무한원으로 보이는 경우에는  $m=0$  으로서

$$E_0 = \tau \pi L_0 (D/f)^2 / 4 \quad \text{로 된다.}$$

또 그림2.94에 나타나듯이 광축외의 상점에 대한 상면의 조도를 생각하자. 물체표면을 상기의 경우와 같이 균일 확산 면으로서 생각하자. 물체면상의 미소면적  $\Delta S$ 의 법선방향의 휘도를  $L_0$ 로 하면  $\theta$  방향의 광도를  $I_\theta$ 는

$$I_\theta = L_0 \cos \theta \cdot \Delta S$$

로 된다. 입사동에 대한 입체각과 렌즈의 투과율을 고려해서 렌즈에서  $\Delta S'$ 로 향하는 광속  $\Phi'_\theta$ 는

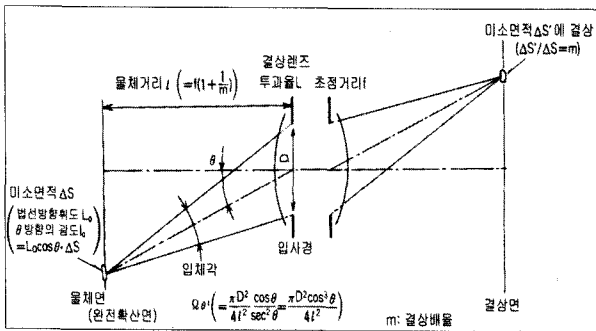


그림2.94 렌즈의 광축외 결상

$$\Phi'_\theta = \tau L_0 \Delta S \pi D^2 \cos^4 \theta / 4l^2$$

로 된다. 전기와 같은 배율을 고려해서 변형하면

$$\Phi'_\theta = \tau \pi L_0 (D/f)^2 \Delta S' \cos^4 \theta / 4(1+m)^2$$

로 되고, 상점에 대한 조도에 대한 조도  $E_\theta$ 는

$$E_\theta = \Phi'_\theta / \Delta S' = \tau \pi L_0 (D/f)^2 \cos^4 \theta / 4(1+m)^2 (1m/m^2)$$

로 되고, (2.6)의 결과와 비교하면

$$E_\theta = E_0 \cos^4 \theta \quad (2.7)$$

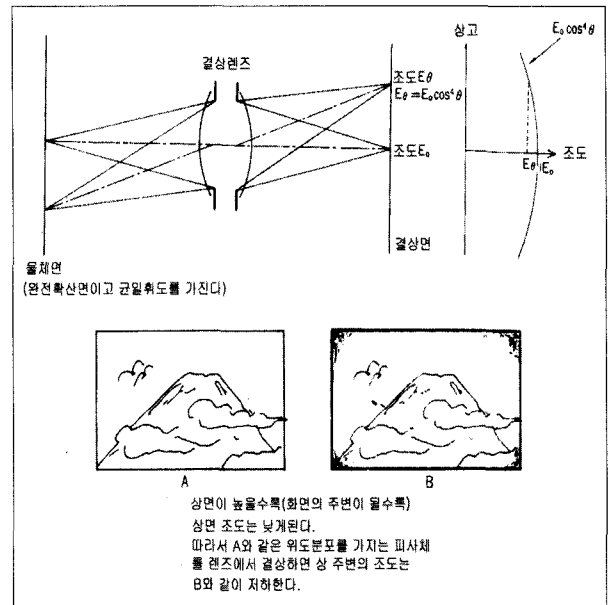


그림2.95  $\cos^4$ 법칙

로 된다. 즉 균일한 휘도를 가진 물체를 렌즈를 사용해서 결상하면 상고가 높게 될수록 상면의 조도가 저하하는 것을 의미하고 있다(그림2.95). 이것은  $\cos^4$ 법칙이라고 한다.  $\cos^4$ 법칙이 성립하는 경우는 이상적인 광학계의 경우로 렌즈수차(특히 왜곡)와 구경식(口徑食)이 없는 경우에 한정된다. 예를 들면  $f\theta$  렌즈와 어안(魚眼)렌즈에서는 높은 상광(像光)의 광밀도가 왜곡수차에 의해 높게 되기 때문에  $\cos^4$ 법칙이 성립되지 않는다.

이상과 같이 렌즈의 결상면상의 밝기(조도)는 렌즈의 투과율과 FNo.뿐만 아니고, 결상배율과  $\cos^4$ 법칙에 의해서도 좌우된다.