
碩 士 學 位 請 求 論 文

바늘구멍 사진기를 이용한
빛의 성질 고찰

指導教授 朴 奎 殷



濟州大學校 教育大學院

物理教育專攻

任 寬 旭

1995年 8月

바늘구멍 사진기를 이용한 빛의 성질 고찰

指導教授 朴奎殷

이 論文을 教育學 碩士學位 論文으로 提出함.

1995年 6月 日

濟州大學校 教育大學院 物理教育專攻

提出者 任寬旭



任寬旭의 教育學 碩士學位 論文을 認准함.

1995年 7月 日

審査委員長 김주용
審査委員 박영진
審査위원 강민영

< 국 문 초 록 >

바늘구멍 사진기를 이용한 빛의 성질 고찰

任 寬 旭

濟州大學校 教育大學院 物理教育專攻

指導教授 朴 奎 殷

간단하게 제작한 바늘구멍 사진기를 이용하여 빛의 성질을 고찰하였다.

바늘구멍 상 실험의 경우는, 발광체와 바늘구멍 사이의 거리와 바늘구멍과 상 사이의 거리에 따른 비율이 상의 크기를 결정하였으며 바늘 구멍의 수에 따라 같은 수의 도립상을 형성하였다. 상의 선명도는 바늘 구멍의 크기에 의해 결정되었다.

슬릿 상 실험의 경우는, 슬릿의 간격이 상의 선명도를 결정하였으며 슬릿의 간격을 일정하게 하고, 발광체와 슬릿 사이의 거리를 변화시켜 나타나는 상의 크기는 거리가 멀수록 작음을 알 수 있었다. 또한 여러 개의 바늘구멍만 놓고 실험한 상과 발광체와 수렴렌즈 사이에 여러 모양의 바늘구멍을 놓고 나타나는 상을 비교하였다.

두 개의 슬릿을 여러 각도에 따라 비스듬히 배치해 놓았을 때는 여러 가지의 상 일그러짐도 나타났다.

차 례

국 문 초 목	i
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	3
1. 렌즈의 원리	3
2. 바늘구멍 사진기의 원리	12
3. 슬릿 사진기의 원리	28
III. 실험 및 분석	29
1. 실험 장치 및 기구	29
1) 카트리지 식 바늘구멍 사진기 제작	30
2) 바늘구멍 제작	32
2. 실험 및 결과분석	34
1) 바늘구멍에 의한 상 실험	34
2) 슬릿에 의한 상 실험	38
3) 수렴렌즈, 바늘구멍, 슬릿에 의한 상 비교 실험	40
4) 슬릿의 각도에 따른 상의 일그러짐	42
IV. 결 론	45
참고문헌	47
Abstract	49

I. 서 론

바늘구멍 사진기는 사진기 가운데에서도 가장 기본적인 상을 맺는 초기 장치이다.¹⁾ 바늘구멍 사진기(Pinhole Camera)의 어원은 오랜 세월을 걸쳐 그림을 그리는 사생(寫生) 도구로 사용되었던 사진기 옵스큐라(Camera Obscura)에서 유래되었으며, 이는 라틴어로 '어두운 방'이라는 뜻을 지니고 있다.^{2,3)}

사진기 옵스큐라의 원리에 대한 최초의 언급은 BC 3세기경 아리스토텔레스의 광학상(Pinhole 像)의 방법론에 이미 기록되어 있다. 그 후 15세기에 이르러, 르네상스 시대의 화가 레오나르도 다 빈치(Leonardo Da Vinci)는 이러한 사진기 옵스큐라의 원리를 이용하여 보다 더 구체적이고 정확한 묘사 방법을 발표하였다.⁴⁾

이러한 사진기 옵스큐라가 세상 사람들에게 널리 알려지기 시작한 것은 16세기 이탈리아의 과학자 포르타(Porta)에 이르러서이다.⁵⁾ 바늘구멍에 의한 사진기 옵스큐라는 선명한 상을 얻기 위하여 바늘구멍 대신 렌즈를 부착하게 되었으며, 이미 17세기에 독일의 요한 찬(Johann Zahn)의 사진기 옵스큐라에 이르러서는 휴대하고 다닐 수 있을 만큼 소형화되었다.

19세기초에 이르러서 사진기 옵스큐라에 의한 상을 직접 그리지 않고 감광 재료를 이용하여 영구적으로 상을 정착시키고자 하는 노력이 시도됨으로써 비로소 본격적인 사진술이 발달하게 되었다.

사진기 옵스큐라는 그 이후로도 많은 발전과정을 거치면서 오늘날과 같은 사진기에 이르게 된다. 사진기 옵스큐라의 한쪽 편에 감광재료를 넣고, 그 반대편에는 감광재료의 상을 맺게 하기 위한 렌즈를 부착하여 그 감광재료에 결상시킬 빛의 양을 마음대로 조절할 수 있는 셔터나 조리개와 같은 기구를 덧붙인 것이 오늘날 우리가 사용하는 사진기의 기본 구성이 된 것이다.

상의 선명함이 렌즈를 사용한 사진기보다도 떨어지는 것이 바늘구멍 사진기의 단점인데 장시간 노출이 가능한 움직임이 없는 피사체 상에는 세부가 부드럽게 찍히는 것과 피사체 심도가 매우 깊다는 장점이 있다.¹⁾ 이 사진기는 분해나 회절 효과와 같은 상의 성질을 연구하는데 이용할 수 있고 선형 일그러짐으로부터 완전히 자유롭다는 특징을 가지고 있는 광학 기기이다.⁶⁾

여러 실험을 통해 빛의 직진에 근거하고 있는 기하광학의 입문과정에서 유용하게 설명⁷⁾되고 있는 바늘구멍 사진기를 직접 제작하여 중등학교에서 쉽게 빛의 성질에 대한 이해를 돕는데 그 목적이 있다.

1993년에 G. Jukovidis⁸⁾는 바늘구멍 상 실험을, 1991년에 J. E. Stewart⁹⁾는 네거티브 바늘구멍 실험을, 1991년에 D. Bissonnette 등⁶⁾은 바늘구멍 사진기의 상보성 실험을 발표한 바 있다.

본 실험에서는, 100V/500W 인 풍로와 전자계산기를 발광체(광원인 동시에 피사체)로 사용하여 발광체와 상면(여기서는 ISO 400인 필름을 사용) 사이에 바늘구멍을 놓고 나타나는 상을 고찰하려 한다. 바늘구멍은 알루미늄박에 표면을 매끄럽게 하기 위하여 바늘을 불에 달구어서 사용하였다. 기존 실험들은 바늘구멍을 1개만 가지고 실험하였는데 여기서는 바늘구멍을 2개, 3개, 4개 뚫었을 때, 또는 바늘구멍이 연속적으로 이어진 슬릿을 가지고 나타나는 상을 알아보려고 한다. 그리고 발광체(풍로)와 상면인 필름사이에 여러 모양의 슬릿을 놓고 나타나는 상도 고찰하려 한다. 여러 개의 바늘구멍과 상 사이에 수렴 렌즈를 놓아 나타나는 상과 바늘구멍만 사용한 실험을 비교 설명하려 한다. 여러 형태의 슬릿의 경우도 마찬가지이다. 그리고 바늘구멍의 크기에 따른 상의 선명도, 슬릿의 간격에 따른 선명도, 바늘구멍과 슬릿의 거리에 따른 상의 선명도에 대해서도 고찰하려 한다. 또한 두 개의 슬릿('자 모양)을 각도에 따라 비스듬히 놓았을 때 나타나는 상의 일그러짐에 대해서도 중점적으로 관찰하려 한다.

II. 이론적 배경

1. 렌즈의 원리

1) 렌즈의 역사

400년 전에 베니스의 귀족인 D. Barbaro가 그 시대의 사진기 옵스큐라에서 광선을 상으로 전환시키는 새롭고도 유익한 방법을 발견해냈다. 그는 방 크기 만한 사진기 옵스큐라에 구멍을 확대하고 원시안(遠視眼)인 사람의 안경에 있는 볼록렌즈로 그것을 채워 넣었다. 다행스럽게도 이 렌즈는 이전에 바늘 구멍으로부터 생겼던 것보다 더 우수한 상을 투영시켰던 것이다. 수백년 이후에 사진술의 출현과 더불어 이러한 발견이 더욱 중요한 것이 되었음이 입증되었다. 이 렌즈를 가진 사진기는 바늘구멍 사진기보다 선명한 상을 제공할 뿐만 아니라 몇분의 일초 동안에도 사진을 찍을 수 있을 정도로 충분히 빛을 들여보낸다. 대부분의 현대적인 사진렌즈는 D. Barbara가 사용했던 그 볼록렌즈에 근거하고 있다.¹⁰⁾

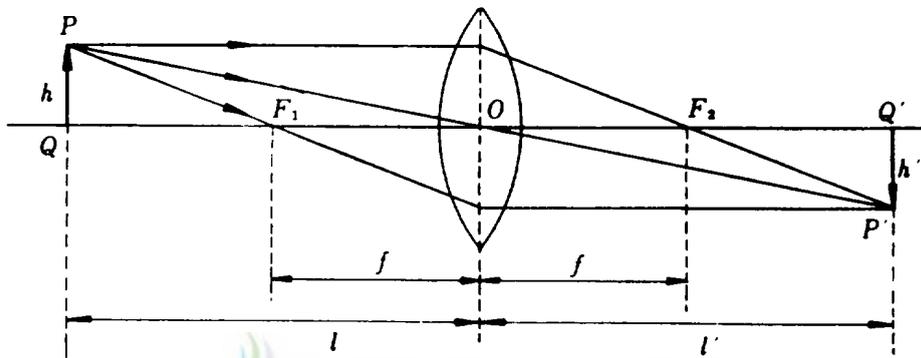
2) 렌즈에 의한 상 작도법

그림 1에서 발광체(화살로 표시)의 상 위치는 다음과 같은 세 가지의 원칙을 써서 작도할 수 있다.¹¹⁾ 즉,

(a) 축에 평행하게 렌즈에 입사한 광선은 직접적으로나 아니면 그 연장선이라도 제 2의 초점 F_2 를 통과한다.

(b) 직접적으로나 혹은 그 연장선이 제 1의 초점 F_1 을 통과한 광선은 렌즈에 입사하고 이 광선이 렌즈로부터 나올 때는 축에 평행하게 된다.

(c) 렌즈의 중심으로 입사하는 광선은 편향되지 않고 통과한다. 렌즈의 중심 근처에서 렌즈는 마치 측면이 평행한 얇은 유리편과 같은 성질을 갖기 때문에, 편향은 없게 된다. 광선의 방향이 불변이고, 렌즈의 두께가 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정되었으므로, 옆쪽으로의 변위는 무시될 수 있기 때문이다.




제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY
 그림 1. 렌즈에 의한 상을 구하는 광선 도식

3) 상(像)의 기본공식과 그 응용

(1) 기본 공식

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l'} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

여기서 f 는 렌즈의 초점거리, l 은 피사체거리이고 l' 은 상거리이다.¹²⁾

식 (1)을 정리하여 상거리 l' 을 구하면

$$l' = \frac{fl}{l-f} \quad (2)$$

가 되고, 이는 정확한 상의 위치를 구하는 데 쓰인다. 피사체가 대단히 먼 경우, 즉 사진기의 핀트 조절을 무한원에서 촬영할 경우는 식 (2)에서 $l \rightarrow \infty$ 면 $l' = f$ 관계가 된다. 즉 대단히 먼 곳의 물체를 촬영한 경우에는 상거리가 초점거리와 같게 됨을 의미한다.

(2) 상의 크기

그림 1에서 피사체의 실제 높이를 h , 렌즈에 의하여 생기는 상의 크기를 h' 라 하면 그림의 기하학적 관계로부터 $h'/h = l'/l$ 가 된다.

여기서 h'/h 의 상의 배율을 M 이라 하면,

$$M = \frac{h'}{h} = \frac{l'}{l} \quad (3)$$

여기서 l 과 l' 은 피사체거리와 상거리를 표시한다.

식 (3)의 l' 을 식 (2)에 대입하면

$$M = \frac{f}{l-f} \quad (4)$$

가 된다. 이에 의하여 상의 크기 l' 은 식 (3)에 의하여 $h' = h \times M$ 의 관계로 구하여진다. 그러므로, 식 (3), (4)로부터 다음과 같은 법칙을 알 수 있다.

첫째, 초점거리가 긴 렌즈를 사용하는 것이 큰 상을 얻을 수 있다.

식 (4)에서 l 를 일정하게 한 경우(같은 피사체를 같은 거리부터 촬영할 경우)를 생각하면 된다. 배율 M 은 이 식의 우변 f 가 크게 되면 따라서 크게 된다.

둘째, 원촌(原寸) 촬영(사진기를 피사체에 가깝게 할수록 상이 크게 되어 어떤 점에서 상이 피사체 실물과 같은 크기가 되는 접근 촬영)의 경우는 식 (4)에서 상의 배율을 $M = 1$ 이라 놓으면 $l = 2f$ 을 얻는다. 원촌수(原寸數) 촬영의 경우에는 피사체거리가 초점거리의 2배가 되는 것을 의미한다.

또 식 (3)에 의하면 $M = 1$ 이면 $l = l'$ 가 되어 원촌수 촬영의 경우는 피사체거리와 상거리가 같다는 의미이다. 그리고 식 $l = 2f$ 에 의하면 양자의 거리는 함께 초점거리의 2배임을 알 수 있다.

셋째, 확대 촬영(피사체 실물보다 필름 위의 상쪽이 크게 촬영되는 것) 경우에는 식 (3)에서 $M > 1$ (혹은 $h' / h > 1$) 로 하고 $l' / l > 1$, 즉 $l' > l$ 가 되는 관계를 얻는다. 이것은 상거리 쪽이 피사체거리보다 크게 되는 것을 의미한다.

(3) 상으로부터 피사체의 크기를 구하는 방법

a) 사진기의 상면을 피사체면에 평행으로 촬영한 경우 그림 1에서 피사체 PQ의 평면과 사진기의 필름면 P'Q'에 촬영될 때 평행 혹은 평행에 가까운 상태에 놓여 있는 필름 위의 상의 크기를 정확하게 측정하면 피사체 실물의 크기를 쉽게 구할 수 있다.

이 경우 피사체 PQ의 크기를 h , 그 상 P'Q'의 크기를 h' 피사체거리 l , 렌즈의 초점거리를 f 라 하면 식 (3)과 (4)로부터 피사체 실물의 크기 h 는

$$h = \frac{h'}{f} (l - f) \quad (5)$$

로 표시된다.

특히 원거리 촬영의 경우는 $h = \frac{h'}{f} l$ 로 해도 상관없다.

b) 피사체와 같은 평면에 길이를 알고 있는 물체가 있을 경우 그림 2에서 피사체 PQ 상의 N점의 상을 N'라 한다.

이때 상의 배율 M은

$$M = \frac{P'Q'}{PQ} = \frac{N'Q'}{NQ} \quad (6)$$

의 관계를 얻은 것은 PQ와 P'Q'가 평행인 것에서 쉽게 증명된다.

그래서 NQ의 길이가 처음부터 알고 있었다면 필름상의 상 N'Q'의 길이를 측정함으로써 식 (6)으로부터 배율 M을 알 수 있고 M을 주면 알고자 하는 피사체의 크기 PQ는 식 (6)으로부터

$$PQ = \frac{P'Q'}{M} \quad (7)$$

가 되는 관계로 상 P'Q'의 크기를 구할 수 있다.

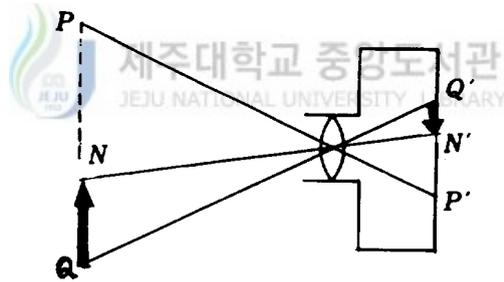


그림 2. 간단한 사진측량(표준물체 QN이 함께 촬영되고 있을 때)

4) 수차 (Aberration)

사진 렌즈는 구경이 유한의 크기를 가지고 있고 또 입사광선의 기울기 때문에 혹은 유리의 굴절률이 파장에 의하여 틀리는 이유에서, Gauss의 결상공식대로 상을 만들지 못하고 여기서부터 여러 가지의 편차가 생긴다. 이와 같은 편차를 총칭해서 수차라 한다.¹²⁾

(1) 색수차 (Chromatic Aberration)

프리즘 또는 렌즈를 통한 백색광이 일곱가지 색으로 분광된다. 빛의 파장에 따라 즉, 색에 따라 굴절각이 다르게 되면 그림 3에서와 같이 적색의 초점과 보라색의 초점이 달라지고 그 중간에 황·녹·청 등의 초점이 있게 되기 때문에 어느 것이 진짜 초점인지 알 수가 없게 된다. 우리

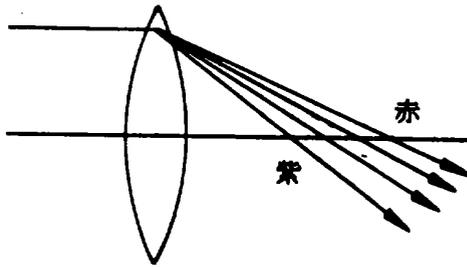


그림 3. 색수차

육안으로는 황색 또는 녹색이 제일 밝게 느껴지기 때문에 이 부근의 색광에 초점을 맞추어도 적색이나 보라색의 흐린 초점이 겹쳐지기 때문에 그 결과는 선명하지 못한 흐린 상밖에 얻을 수 없게 된다. 이와 같이 색광의 파장에 따라 초점을 달리하여 흐린 상을 만들게 되는 렌즈상의 결함을 색수차라 한다.

빛을 분산시키는 정도는 유리의 성질에 따라 다르나 파장이 짧은 빛일수록 굴절률이 큰 것은 변함이 없다.

색수차를 보정하기 위해서 굴절률이 달라서 갈라진 광선을 하나로 합치시키는 수단을 강구하면

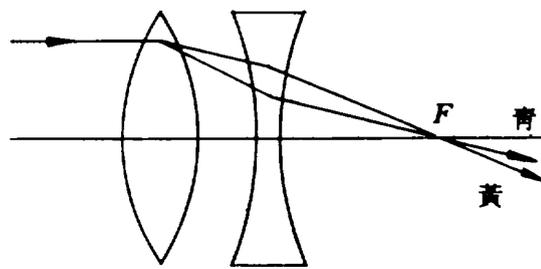


그림 4. 색수차의 보정

되는 것이나 각 파장의 광선을 부채를 접는 것처럼 일치시키기는 불가능하기 때문에 대개 분광 스펙트럼의 배열 중에서 황색과 청색의 광선을 오목렌즈를 써서 그림 4와 같이 일치시켜 보정을 하는데 이렇게 되면 다른 색광도 부근에 모여져서 수차를 축소시킬 수 있게 된다. 이상과 같이 2개의 대표 색으로 색수차를 보정한 렌즈를 Acromatic(제판용)렌즈라 한다.

(2) 비점수차 (Astigmatism)

물체의 점이 광축에서 더 떨어진 위치에 있을 경우에는 조리개를 적게 해도 제거할 수 없는 수차가 눈에 띄게 된다. 그림 5에서와 같이 물체의 점을 출발하여 조리개 중심 부분을 비스듬히 통과하는 미소 광속은 렌즈 통과 후 한 점에 수렴하지 않고 일반적으로 두 개의 초점을 맺는다.

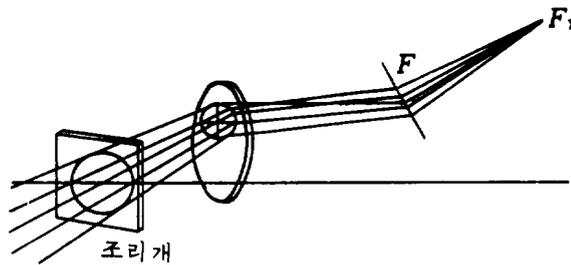


그림5. 비점수차

이와 같은 두 개로 나누어지는 수차를 비점수차라 한다.



(3) 상의 일그러짐 (Distortion)

이상의 모든 수차가 전부 보정되었다 하더라도 물체와 상과의 형상이 유사하다고는 할 수 없다. 일그러짐이라 함은 광축에서 먼 직선은 상면 위에 직선으로서 결상하지 않는 현상이다. 그림 6에서 조리개를 렌즈 전방에 놓으면 직선은 중앙이 광축에서 멀어

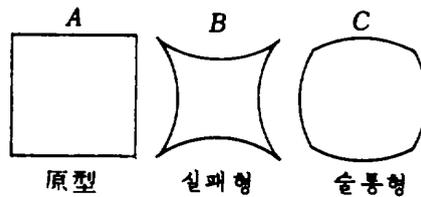


그림 6. 상의 일그러짐

진 C가 되며 조리개를 렌즈 후방에 놓으면 직선은 중앙이 앞 축에 가까운 B가 된다.

5) 해상력 (Resolving Power)

(1) 해상력의 정의

'해상력이란 어떤 렌즈로서 촬영하였을 때 후면 상에서 어느 정도 접근한 두 개의 피사체가 두 개의 물체로 분리 재현할 수 있는가' 하는 기준을 말하고 통상적으로 $1mm$ 간의 가는 선의 수로 정의한다.¹³⁾

(2) 이상렌즈와 실제렌즈의 해상력

모든 광차와 구경식(11徑食)이 없고 기하학적으로 완전하다 하더라도 빛의 회절현상으로 어느 정도의 흐린 상이 나타난다. 그러나 이상렌즈의 해상력은 밝을 (F 치가 작은 것)수록 그리고 화면 중앙에 가까울수록 커지나 실제렌즈에 있어서는 주로 잔존수차의 영향 등으로 이와는 반대로 밝은 렌즈일수록 해상력이 나빠지는 것이 보통이다. 그러므로 회절현상이 극단으로 증대할 때까지는 빛의 조리개를 줄여서 사용하는 편이 해상력을 증가시킨다.

(3) 회절상 (Airy Disk)

광축에 평행으로 이상렌즈에 입사한 광선은 초점면상에 휘도를 가진 작은 원과 주위에 연한 명암의 동심원으로 된 회절상인 흐린 상이 생긴다. 그 흐린 정도는 F 치에 비례하고 초점거리에는 관계없다.

(4) 해상력의 선명도

현상한 사진을 보았을 때 선명한가 앓는가 하는 정도를 흔히 선명도가 좋고

나뻘므로 표현한다. 이것은 다분히 심리적 개념이다. 그러나 일반적으로 개인차가 적은 것을 보면 중요한 문제이나 아직 수식적으로 표시하는 방법이 없다.

6) 피사계 심도 (Depth of Field)

보통 사진기는 단 하나의 거리밖에는 초점을 맞출 수가 없으므로 엄밀한 의미에서는 동시에 상이한 거리에 있는 두 목표물에 대해 초점을 맞춘다는 것은 불가능한 일이다.

그림 7에서 물체 A에 핀트를 맞추면 B가 흐려지고 B에 핀트를 맞추면 A가 흐려 보이기 때문이다. 그러

나 지금 A에 핀트를 맞춰두고 B를 A에 조금씩 접근시키면 점점 흐린 정도가 감소되고 어느 정도 접근하게 되면 A의 선명도와 구별할 수 없을 정도로 선명해지게 되

고 A와 같은 거리에 오면 가장 선명도가 좋아졌다가

A를 통과해서 B가 사진기 쪽으로 가까워짐에 따라 어느 거리까지 선명해 보이다가 또 차츰 흐려져 보이게 된다.

즉 초점을 맞춘 피사체 A를 중심으로 해서 그 전후에 초점을 맞춘 것과 같은 정도의 선명도를 인정할 수 있는 범위가 있는 것으로 그 중 제일 가까운 점에서 제일 먼 점까지의 거리의 범위를 피사계 심도라 한다.

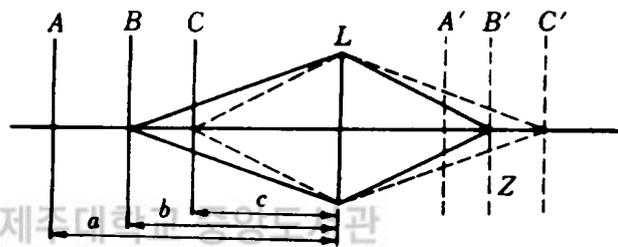


그림 7. 피사계 심도

(1) 피사계 심도의 성질

피사계 심도는 촬영거리, 사용 렌즈의 초점거리, 조리개의 크기에 따라 다음과 같이 달라진다.

- a) 피사계 심도는 조리개를 조릴수록 깊어지고 열수록 얕아진다.
- b) 피사계 심도는 사용렌즈의 초점거리가 짧을수록 깊어지고 길수록 얕아진다.
- c) 피사계 심도는 촬영거리가 멀수록 깊어지고 가까울수록 얕아진다.
- d) 피사계 심도는 초점을 맞춘 곳에서 먼 쪽으로 깊고 가까운 쪽은 얕다.

2. 바늘구멍 사진기의 원리

1) 바늘구멍 (Pinhole)

만약에 토끼모양의 그림자를 만들거나, 스크린 상에 토끼모양의 도립상을 나타내기 위해서 슬라이드 영사기 앞에서 손가락을 움직인다면 어떻게 될까?

그림 8에서와 같이, 플라스틱 필름통과 핀을 사용하면 놀랄 정도의 유사한 현상을 포착할 수 있다. 이 실험을 하기 위해서, 압정을 사용하여 필름통의 밑바닥 중앙에 구멍을 뚫는다. 그리고 나서, 필름통 옆면 중간쯤에 핀으로 구멍을 뚫어 밑바닥 중앙의 구멍과 핀 머리 부분이 일치할 때까지 핀을 밀어 올린다.

그러면 핀 머리 부분이 뒤집힌 어두운 상이 보일 것이다. 왜 이와 같은 현상이 일어날까? Mamola¹⁴⁾ 는 The Physics Teacher에 이러한 현상을 처음으로 소개하였고, Edge¹⁵⁾ 는 이 장치를 가지고 눈 안에서의 현상을 관찰하였고

색수차에 대해 설명하였다.

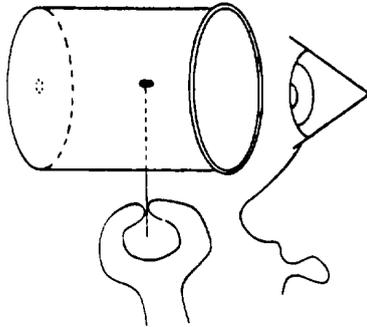
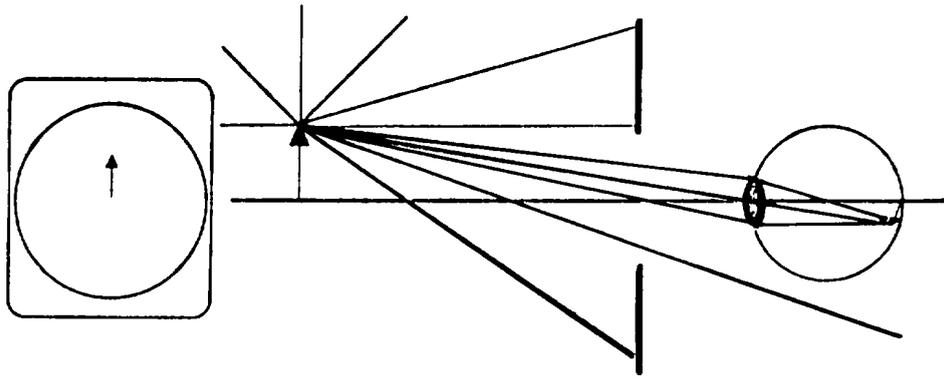


그림 8. 필름 통과 편을 사용한 실험

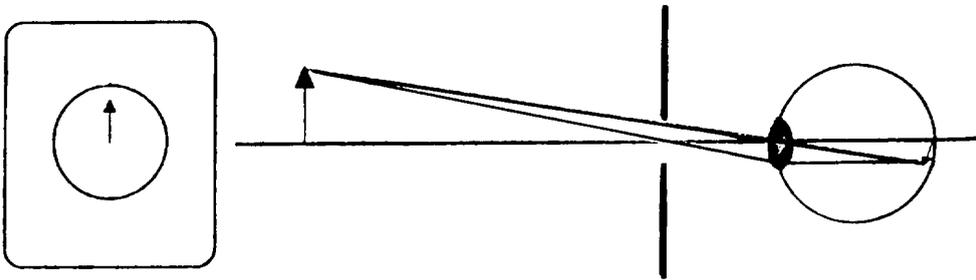
그림 9는 피사체가 바늘구멍을 통해 망막에 상을 어떻게 맺히는가를 설명하는 광선 도식이고, 일정 비율로 축소하여 그려진 것임에 유의하자. 거꾸로 도립상을 형성하였을 때 다르게 나타내기 위해서 피사체를 화살로 나타냈다. 단 화살의 크기와 거리는 임의적으로 하였다. 이 실험을 통하여, 현상관찰에서 “눈”이 중요한 매개체 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 이런 간단한 실험으로 소의 눈까지 분해할 수 있다¹⁶⁾. 여기서 바늘구멍은 눈과 빛의 이해를 돕는 가장 유용한 교육적인 도구라고 생각된다¹⁷⁾.

바늘구멍은 빛의 일부분만을 통과시키기는, 제한된 시야로서 또는 상을 거꾸로 맺히게 하는 매체로서, 사소한 것으로 취급할 수도 있지만 시점 여하에 달려있다는 점에서, 단순하기보다는 복잡하다고 여겨진다. 바늘구멍은 빛을 어떤 부분에만 통과시키도록 제한한다.

결론적으로 어떤 장면은 사방에서 빛을 반사시키고 있다. 그러므로 우리가 보는 것은 눈을 통해 들어온 빛일 뿐이다.

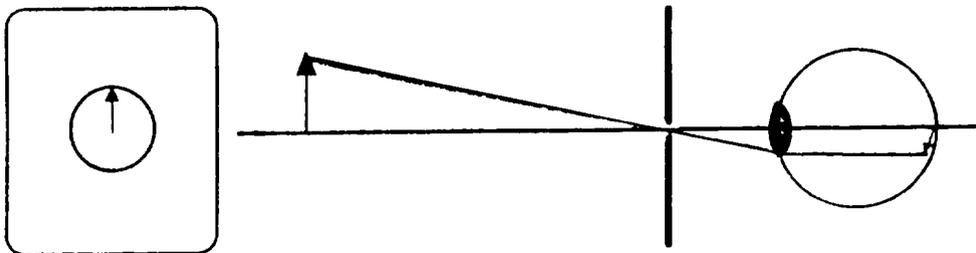


a)



b)


 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



c)

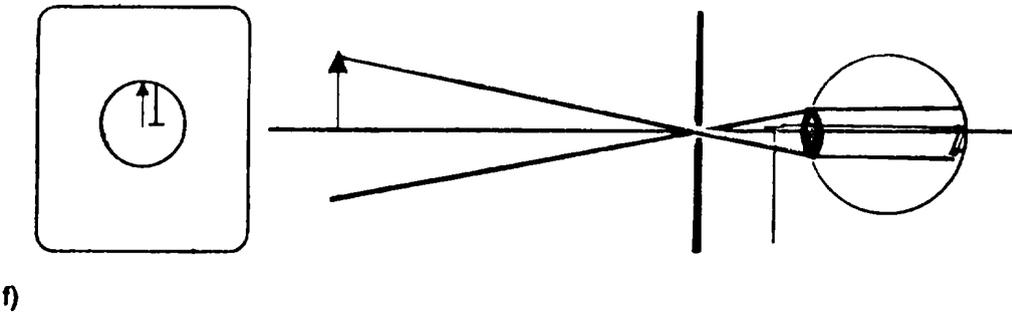
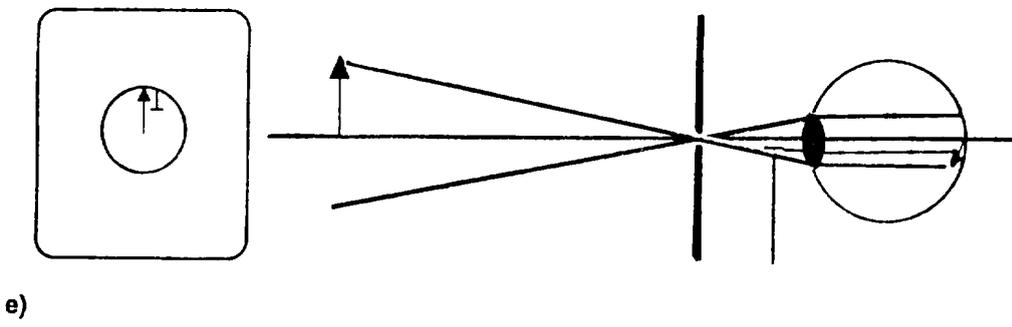
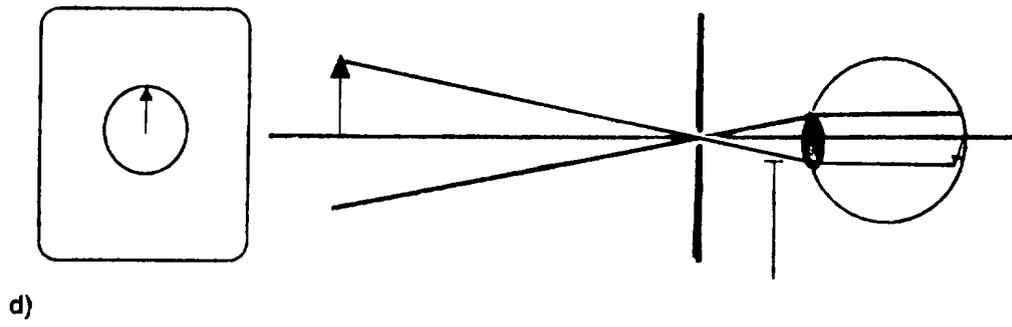


그림 9. 물체, 바늘구멍, 편과 눈의 배열에 따른 광선 도식

그림 9의 오른쪽 부분은 물체, 바늘구멍, 핀과 눈의 배열을 나타낸 그림이다. 왼쪽 부분의 직사각형의 상자는 사람이 빛을 뇌에서 인지한 후 눈을 통해서 보게 되는 것이다.

a) 정상인 상태에서는 물체에서 반사되는 빛 중 극히 일부분만이 동공을 통해 들어온다. 들어온 빛은 대안(對眼)렌즈와 눈 내의 유리 액에 의해 초점이 맞춰져서, 망막에 상을 거꾸로 형성하게 된다

b) 바늘구멍을 작게 할 수록 빛은 더욱 더 차단된다. 즉 바늘구멍을 통과한 빛만 영향을 미친다.

c) 물체의 윗부분에서 반사된 광선은 바늘구멍 반대편에 있는 밑부분으로 투영된다. 즉 동공에 있는 스크린은 물체의 상을 거꾸로 투영시킨다. 마찬가지로 망막에 있는 상 또한 도립상이다

d) 망막에 맺히는 상의 크기를 두 선으로 나타내었다.

e, f) 많은 빛이 바늘구멍을 통과하지만 동공을 통해 망막에 들어가는 것은 극히 일부분이다. 다시 말해 바늘구멍의 크기와 동공의 크기가 망막에 들어오는 빛의 양을 결정할 수 있다. 그래서 핀을 올리게 되면 바늘구멍으로부터 나타나는 빛의 밑부분은 차단된다. 그때의 빛들은 망막상의 밑부분에 핀을 투영시킨다. 그런데 그 상은 도립상이 아닌 정립상이다. 즉 망막에 맺힌 핀의 상은 정립상이고 물체의 상은 도립상임을 알 수 있다. 그러므로 뇌가 망막에 맺힌 모든 것을 인지하고 난 이후이기에 상은 정립상처럼 보이고 그림자는 도립상처럼 보인다. 만약에 바늘구멍없이 눈 앞에서 핀을 올린다면 핀의 상은 보이지 않은 것이다. 왜냐하면 손가락을 슬라이드 영사기 렌즈 바로 앞에 놓으면 스크린에 어두운 손가락 상이 보이지 않는 이유와 같기 때문이다.

2) 점 상 (Point Image)

별처럼 멀리 떨어진 점상은 그 자체가 점이라기 보다는 작은 반점이다. 확장된 물체의 상이란 바로 그런 작은 반점 혹은 점상들의 집합이라 여겨진다. 각 점들의 상은 확장된 상 안에서 분별할 수 있을 만큼 매우 세밀히 묘사되어진다.

바늘구멍 사진기는 불투명한 스크린 안에 작은 구멍으로 이루어져 있다. 각 물체의 점은 이 스크린에 그림자를 형성한다. 단일 명점의 그림자는 밝은 점으로서, 이 점을 그 점에 대한 상이라 부른다. 점상이 작을수록 더 세밀한 묘사로 확장된 물체를 관찰할 수 있다.

그래서 많은 방법들 중에서 가장 좋은 바늘구멍이라 함은 가장 작은 점상을 만들어낸 것을 말한다. 바늘구멍 반경이 클 때, 멀리 떨어진 점상의 상은 기하광학 또는 광선 광학으로 알아낼 수 있다. 상이 균일한 원판이라면, 바늘구멍을 포함하고 있는 스크린의 기하학적 그림자에 지나지 않는다. 그림 10에서 바늘구멍 반경은 s , 그리고 상의 반경은 r 로 나타내었다. 광선 근사식에서 매우 멀리 떨어진 물체에 대해서는 $r = s$ 이다.

좀 더 작은 점상을 만들려면, 제한된 범위에서 바늘구멍을 줄일 수 있다. 파장 λ 와 초점거리 f 에 의존하는 어떤 값 이상으로 s 가 감소할 때 상은 더 이상 균일한 원판이 아니다. 오히려 그것은 상당히 큰 고리모양 구조를 보여, 기하광학으로는 더 이상 설명할 적당한 기술 방법이 없고, 이때부터는 빛의 파동성을 갖고 설명해야 한다.

만약 바늘구멍 크기를 더 줄인다면, 상의 반경은 더 이상 감소하지 않고 증가되기 시작함을 알 수 있다. 프라운호퍼(Fraunhofer) 회절이 적용되는 어떤 점에서 상의 반경 r 은 바늘구멍 반경 s 에 반비례한다. 멀리 떨어진 점의 상은 바로 바늘구멍의 회절 무늬이다. 원형의 바늘구멍에 대한 상의 반경은

$r = 0.61 \lambda f / s$ 로 주어진다.¹⁸⁾

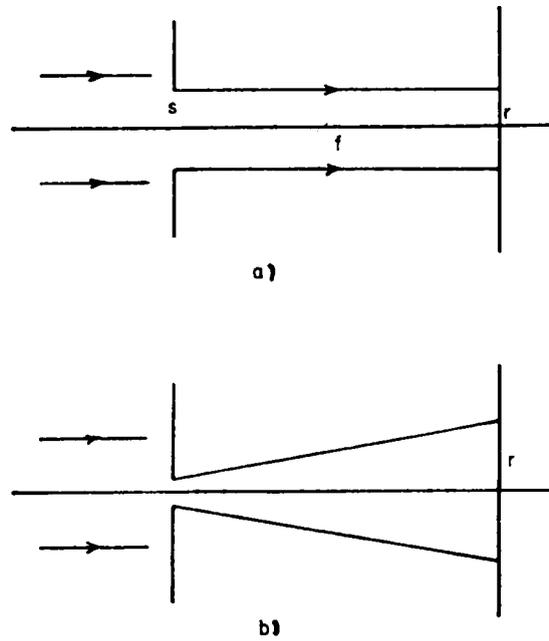


그림 10. 무한대에서 바늘구멍 사진기 초점 맞추기
 a) 바늘구멍이 큰 경우는 기하학적 접근에서
 b) 바늘구멍이 작은 경우는 프라운호퍼 접근에서

s 의 값은 근사적인 적정 바늘구멍 반경이고 산정된 값을 계산하기 위해서 이론적 연구를 오래 전부터 해 오고 있지만, 이러한 개선은 근본적으로 불가능하다. 왜냐하면 가장 관심 있는 부분 즉, 적정크기의 바늘구멍에 대한 근사 값은 유효하지 않기 때문이다. 또한 균일 원판과 프라운호퍼 회절 판을 비교하는 데는 개념적 어려움이 따른다. 따라서, 적정한 해상도를 갖는 바늘구멍 사진기의 정확한 값을 실험적으로 구할 수밖에 없다.

3) 두 점에서의 해상도(Two-Point Resolution)

일반적으로 고립된 점상보다는 여러 점과 선 사이의 해상도에 더 많은 관심을 갖는다. 이렇게 할 때, 상의 반지름 r 보다는 해상도의 한계를 논하는 것이 더욱 유용하다.

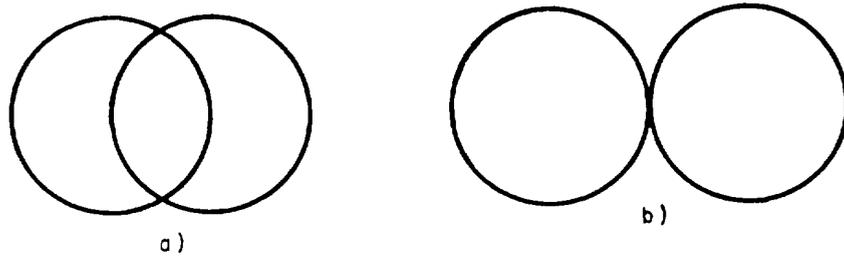


그림 11. 광선 접근에서의 해상도의 한계

a) 분해되지 않음 b) 잘 분해됨

바늘구멍이 $(\lambda f)^{1/2}$ 와 비교하여 더 클 때, 단일 점의 상은 반지름 $r = s$ 인 균일한 원판이다. 두 원판이 너무 붙어 있으면, 그 물체가 두 개의 불연속적인 점으로 이루어져 있는 지를 결정할 수 없다. a)에서는 점들을 분해할 수 없다는 것에 동의 할 것이다. 여기에서는 상들이 상의 반지름만큼 거리를 둬으로써 분리되고 있다. b)에서 각 점들은 그들의 반지름에 의해 분리되어 있고, 잘 분해되어져 있음을 볼 수 있다.

해상도의 한계는 점들이 분해된 수만큼의 거리에 관계 있다. 이는 s 와 $2s$ 사이에 있는 어느 지점과 같다. 그리고 실험 결과에 대해 예측할 수 있는 것과 같다. 두 점의 해상도 한계는 기하광학에서 근사적으로 $1.5s$ 안에 있음을 기준으로 채택한다.

바늘구멍이 적정 크기에 비하여 작을 때는 프라운호퍼 회절을 적용한다. 이 때 점상은 균일한 원판이 아니라, 중앙이 희미한 고리모양으로 둘러 쌓이되 최대로 진한 것으로 이루어져 있다. 빛은 균일하게 분포되지 않고 중심에서부터 순식간에 흩어져 버린다. 앞선 논의와 관련된 것은 아니나, 기존에 잘 알려진 레일리 기준(Rayleigh criterion)을 사용해야 한다.¹⁸⁾ 두 점의 해상도의 한계는 프라운호퍼 근사식에서 $0.61f/s$ 이다.

4) 허위 해상도 (Spurious Resolution)

이는 흥미있는 현상으로 주기적인 피사체는 해상도의 한계 밑에 있음에도 불구하고 허위 주기적인 구조를 보인다. 다시 말해서 세부 사항에 대해 쉽게 간과할 수 있다. 허위 해상도는 기하광학으로 설명이 가능하다. 허위 해상도란 바늘구멍 사진기에서 바늘구멍이 충분히 커서 광선광학이 좋은 근사법인 경우에 생겨난다. 허위 해상도에 대해 시사하는 바는 순전히 기하학적 효과이다.

피사체가 3개의 막대일 때 그림 12는 허위 해상도의 발단을 보여준다. a)에서는 해상도의 한계가 작을 경우이고, 세개의 막대의 상은 매우 선명하다. 예를 들어 바늘구멍을 넓힘에 따라, 다시 말해 해상도의 한계를 증가시킴으로써 b)처럼 막대의 상이 선명하지 않음을 알 수 있다. 바늘구멍 크기를 계속 넓히면, c)처럼 막대 상이 겹쳐지면서 흐릿하여 선명하지 못함을 알 수 있다. 해상도의 한계를 크게 할 때, 거기엔 상당한 부분 겹침이 생기며 이는 십자 빗금 친 부분에서 허위의 두 개의 막대가 생김을 알려 준다. 간단한 세 개의 막대 피사체인 경우에서 우리는 쉽게 세 개의 막대가 2개로 나타나는 허상은 해상도를 좀 더 복잡한 피사체에서는 허위 해상도는 실제 구조에 대해서 실수를 유발할 수 있으므로 허위 해상도를 피해야 한다. 허위 해상도는 슬라이드 영사기에 막대 물체를 투과함으로써 쉽게 증명할 수 있다. 그리고 스크린에서 상의 초점을 이탈시킴으로써 쉽게 증명 가능하다. 초점 오류는 막대로 허위

해상도의 징후인 신호를 분석할 수 없을 때 매우 중요하다.

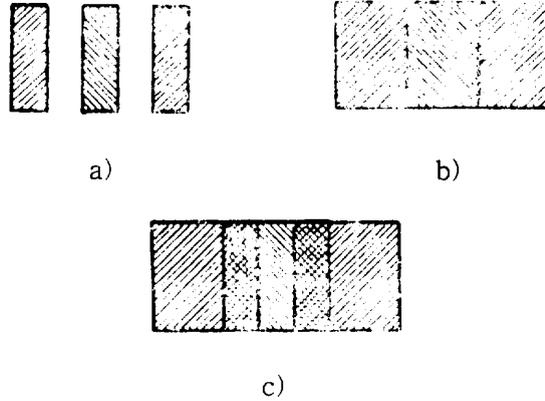


그림 12. 막대 피사체의 상 a) 해상도의 한계가 작은 경우
 b) 해상도의 한계가 증가하는 경우 c) 해상도의 한계가 큰 경우

5) 상의 결점(Defects in the Image)

대부분의 렌즈계는 선형의 상 일그러짐이 있다. 상 일그러짐이란 예를 들어, 정사각형이 평평한 사각형이 아니라, 측면이 약간 볼록한 통모양으로 상이 맺히는 것을 말한다. 단순히 기하학상의 문제로 인해 바늘구멍 사진기는 자유로운 상 일그러짐을 보여준다. Selwyn은 간단한 물리적 근거를 이용하여, 파동 이론 처럼 일그러짐 없이 상이 맺게 됨을 예측하였다.¹⁹⁾ 바늘구멍은 매우 밝은 피사체 심도를 지니고 있어, 절대 일그러짐이 없는 상을 형성해 주는 유일한 장치이다.

바늘구멍은 수차계수에서 어려움이 많다. 주어진 렌즈 구경의 최적 초점거리는 평평한 정사각형이 아닌 약간 볼록한 면이 있는 통으로써 정사각형이다. 단순한 기하학상의 고려도 바늘구멍 사진기는 자유로운 상 일그러짐을 보여준

다. 파동이론과 게다가 일그러짐이 없는 상을 예언하기 위해 단순한 물리적 근거를 이용한다.

주어진 렌즈 구경의 최적 초점거리는 s^2/λ 이다. 스펙트럼의 가시영역에서 파장이 400 ~ 700 nm에서 혹은 $\pm 20\%$ 변화한다는 것은, 곧 파장이 550nm임을 일컫는다. 위와 같은 결과로 바늘구멍이 매우 크지 않는 범위 내에서 바늘구멍 사진기가 색수차를 나타낸다고 기대할 수 있다. 광축에서 벗어난 중요한 수차는 비점수차이다. 바늘구멍이 광축에서 벗어나 한 점에서 잘 보여질 때는 원형보다는 타원형으로 나타나야 한다. 이는 상에 대한 심각한 에너지 감소를 일으킨다는 것을 암시한다.

바늘구멍 사진기의 빛 수렴력은 낮다. 만약 바늘구멍 사진기의 초점거리를 s^2/λ 로 만들 수 있다면 그때 가시광선의 초점비율 F 치는, 수 센티미터의 초점거리에 대해 약 200정도이다. 그래서 사진사들은 위 사실에 대해 낮은 구경 때문에 아주 느린 계로 간주한다. 그렇지만 바늘구멍 사진기는 거의 무한도 피사체 심도를 제공한다. 사진의 화각을 매우 넓게 하여 노출시키는 능력은, 상의 면 구석에서 생기는 노출 손실을 수용하는 능력에 달려있다. 이 문제는 바늘구멍 사진기에만 국한된 것이 아니라 거의 모든 상 시스템에 같은 영향을 준다.

6) 상의 형성

바늘구멍이 어떻게 상을 형성하는가를 그림 13은 설명한다.

a) 피사체의 각 점으로부터 빛은 각 방향으로 직진하여 상면에 도달한다. 그러나 이 경우에는 피사체의 한 점으로부터의 빛은 상면의 각 점으로 분산되며, 피사체의 각 점으로부터의 빛에 방해되어 상은 형성되지 않는다.

사진기의 전면에 작은 구멍을 만들면 피사체의 각 점으로부터의 빛은 그 구

명을 통하는 것만이 상면에 도달한다. 그리고 이 입사광의 각각은 상면에서의 입사각이 다르기 때문에 서로 방해하는 일은 없다. 이렇게 원리적으로는 피사체와 상면의 각 한 점이 직선으로 연결되어 도립상을 형성한다.

b) 바늘구멍을 만드는 판이 얇을수록, 또 바늘구멍이 작을수록 피사체의 각 점으로부터의 빛을 완전히 하나로 조일 수가 있어 상도 선명하다. 단 이 경우 회절의 영향은 고려하지 않는다. 피사체의 각 점으로부터의 빛을 바늘구멍에서 하나로 만드는 것은 실제로 불가능하다. 각 점으로부터의 빛은 광다발이 되어 상면에 도달하므로 피사체의 각 점은 작은 원으로서 상을 맺고 따라서 선명도가 저하된다. 회절현상이 생기기 직전까지 바늘구멍을 작게 하면 상을 선명하게 할 수 있으니, 통과하는 광량이 적기 때문에 노출시간이 길어진다.

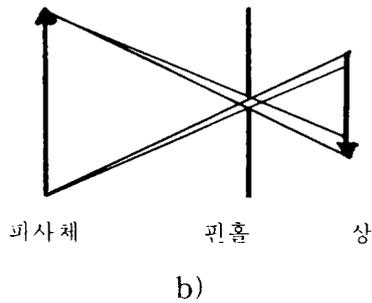
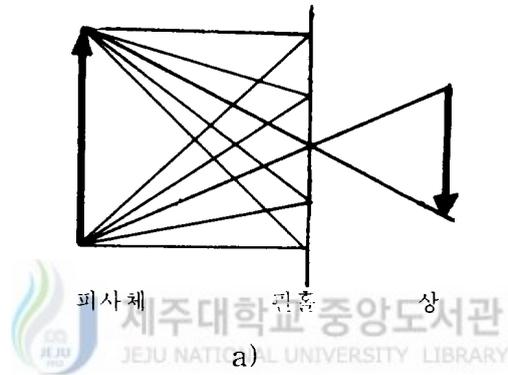


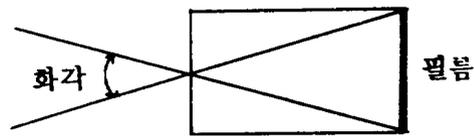
그림 13. 바늘구멍 상의 형성

7) 바늘구멍 사진기의 화각

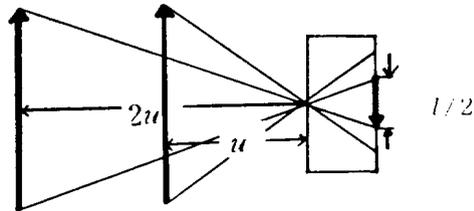
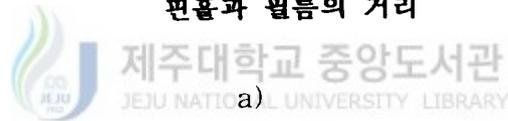
바늘구멍 사진기의 화각은 그림 14에서 처럼 필름 사이즈 혹은 필름과 바늘구멍 사이의 거리로 정해진다.

a) 바늘구멍 사진기의 화각은 필름 크기와 바늘구멍으로 부터 필름까지의 거리를 재어 그림과 같이 T자를 만들어 그 상단과 하단에서 바늘구멍에서 교차하도록 2개의 직선을 그었을 때 생기는 각도이다. 필름과 바늘구멍 사이의 거리가 길어지면 화각은 좁아진다.

b) 필름과 바늘구멍 사이의 거리가 고정되어 있는 사진기는 피사체로부터 바늘구멍까지의 거리(u)가 상의 크기를 결정한다. 피사체로부터 바늘구멍까지의 거리가 2배($2u$)가 되면 상은 $1/2$ 이 되고, 거리가 3배되면 $1/3$ 이 된다.



편향과 필름의 거리



b)

그림 14. 바늘구멍 사진기의 화각

8) 상의 크기를 구하는 법

상의 크기는 피사체의 크기, 바늘구멍과 피사체와의 거리, 바늘구멍과 필름과의 거리에 관계가 있다. 이것을 식으로 하면,

$$\frac{\text{피사체의 크기}}{\text{상의 크기}} = \frac{\text{핀홀과 피사체와의 거리}}{\text{핀홀과 필름과의 거리}}$$

한다. 즉

$$\text{상의 크기} = \frac{\text{핀홀과 피사체와의 거리} \times \text{피사체의 크기}}{\text{핀홀과 필름과의 거리}}$$

가 된다. 바늘구멍으로부터 필름까지의 거리가 고정되어 있는 사진기는 그 거리의 값은 정수가 된다. 이렇게 하여 계산된 상의 크기가 필름의 크기보다 크면 피사체의 일부가 상면으로부터 빠져 나와 버린다.

9) 바늘구멍의 최적 크기

바늘구멍의 구경이 크면 점으로 맺어야 하는 상이 흐려져 착란원이 되어 버리고 또 너무 작으면 회절현상으로 상이 휘어져 점상이 원형인 상이 되어 버리므로 적절한 크기를 찾아야 한다.

바늘구멍의 최적직경 D_0 는 다음 식으로 구해진다.¹⁾

$$D_0 = \sqrt{K \lambda L} \quad (8)$$

K 는 정수, λ 는 빛의 파장, L 은 바늘구멍과 필름과의 거리이다. 이 식에 있어서 K 와 파장은 일정하므로 더욱 편리한 식으로서, $D_0 = \sqrt{0.0013L}$ 을 사용하여 최적직경을 구할 수 있다. 이 때 D_0 와 L 의 단위가 밀리미터인 경우에는 $D_0 = 0.036\sqrt{L}$, D_0 와 L 의 단위가 인치인 경우에는 $D_0 = 0.007\sqrt{L}$ 로 표현 된다.

10) 바늘구멍 사진기의 구조

(1) 몸체

바늘구멍 사진기의 몸체는 차광성만 있으면 작은 상자나 캔으로 만들 수 있다. 단 이 경우에는 노출한 필름을 교환하기 위한 암실이나 어둠상자가 필요하다. 카트리리지 필름을 사용하면 연속하여 몇 차례의 촬영이 가능하다. 또 보통 사진기에 렌즈 대신에 바늘구멍을 붙여 바늘구멍 사진기로서 이용할 수도 있다. 주름 상자식이 아닌 사진기는 압축식 경동을 사용하면 화각을 바꿀 수 있다. 몸체의 전면과 후면은 평행해야 하며, 후면 즉 바늘구멍의 반대측은 필름의 평면성을 유지하기 위하여 평판이어야 한다. 또 바늘구멍에는 커버(셔터)를 붙여서 촬영시 외에는 빛이 들어가지 않도록 한다.

(2) 몸체의 내부

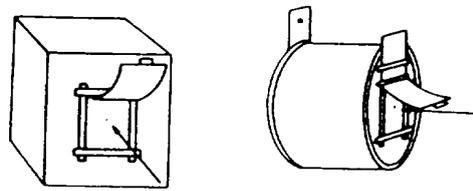
상자나 캔으로 만든 몸체의 내부에는 반사를 막기 위해 광택이 없는 검은 페인트를 칠하거나 광택이 없는 흑색 종이를 바른다. 캔 모양의 몸체로 캔의 뚜껑이 플라스틱으로 되어 있는 경우에는 종이가 떨어지기 쉬우므로 검은 불지를 끼워 넣으면 된다. 이것은 캔을 보강하는 역할도 한다. 또 캔 모양 몸체에는 후부에도 뚜껑을 달아 차광성이 있는 검은 테이프를 붙이고 빛이 입사하거나 촬영 중에 떨어지지 않도록 한다.

필름은 몸체의 내측에 테이프로 붙인다. 또 몸체에 받침대나 짧은 다리를 달아 캔이 넘어지거나 구르지 않도록 한다. 그림 15는 바늘구멍 사진기의 구조를 설명한 것이다.

a) 상자나 캔을 이용할 경우에는 뚜껑이나 커버를 바늘구멍의 반대측에 단단히 붙이면 된다. 불지라면 내측과 외측을 테이프로 고정하여 보강하고 안쪽을 검게 한다. 화질은 바늘구멍을 만드는 방법에 따라 크게 좌우된다.

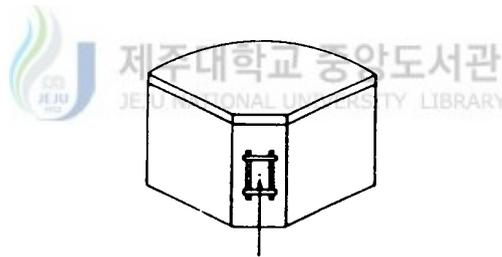
b) 파노라마형에서는 $10 \times 24 \text{cm}$ 의 필름을 사용한다($20 \times 24 \text{cm}$ 의 필름을 2개

로 자른다). 불지로 형을 만들고 검은 마스킹 테이프로 서로 붙여서 바늘구멍을 만든 알루미늄박을 붙이기 전에 내측과 외측을 검은 광택이 없는 페인트로 바른다. 큰 사이즈의 네거티브를 얻을 수 있기 때문에 밀착 프린트하면 화상의 선명함은 충분하다. 수평방향의 촬영각도는 125~130도 이고, 끝부분에는 적당한 노광을 주면 중심부는 다소 노광과도가 되는데 이 부분은 밀착 프린트할 때 인화하여 수정할 수 있다.



상자형 바늘구멍 사진기 통형 바늘구멍 사진기

a)



파노라마형 바늘구멍 사진기

b)

그림 15. 바늘구멍 사진기의 구조

3. 슬릿 사진기의 원리

슬릿은 빛을 좁혀서 통과시키는 장치로 분광기 등 광학 측정기에 사용된다. 보통 2개의 칼날 모양인 것을 마주 보게 하여 빛이 통하는 가는 틈을 낸 구조의 것이 많으며, 한쪽 또는 양쪽 날을 나사로 돌려 통하는 빛의 너비를 조절할 수 있게 되어 있다. 회절격자의 선(빛을 통하지 않음)과 선 사이로 같은 구실을 하며, 일종의 슬릿이라고 할 수 있다.

슬릿 사진기는 경마나 자동차 경주 등의 사진 관정에 쓰이는 사진기이다. 사진기 전면을 횡단 주행하는 자동차 등의 동체(動體) 촬영에 있어서는, 동체의 주행속도에 맞추어 사진기를 회전시키면서 촬영하면 동체의 상은 필름과의 상대속도가 0이 되므로 필름에 상이 고정되어 동체를 선명하게 찍을 수 있다. 이 방법을 응용하여 사진기의 바로 앞에 0.3 ~ 1.0mm 슬릿을 골라인에 맞추어 동체가 필름에 찍히는 것과 같은 속도로 필름을 이용하여 촬영함으로써 레이스의 도착 순서를 기록할 수 있다.²⁰⁾

그러나 여기서는 연속적으로 이어진 바늘구멍들을 슬릿으로 사용하였다.

Ⅲ. 실험 및 분석

1. 실험 장치 및 기구

1) 카트리지 식 바늘구멍 사진기 제작

(1) 준비물

- 사이즈 126(26×26mm)의 카트리지 필름 1개
- 32×144mm의 얇은 검은 색의 불지(A) 1장
- 38×70mm의 딱딱한 검은 색 불지(B) 1장
- (여기에는 중앙에 13mm 사방 개구부를 붙인다)
- 25mm사방의 경질 알루미늄 박 1장
- 25mm사방의 검은 종이 1장
- 고무밴드(두껍고 강한 것) 2개
- 바늘 1자루
- 검은 차광(마스킹)테이프
- 5원짜리나 10원짜리 동전 혹은 이에 준하는 것 1개

(2) 카트리지 식 바늘구멍 사진기를 만드는 방법

그림 16은 카트리지 식 바늘구멍 사진기를 제작 방법을 설명한다.

- a) 자와 연필로 불지(A)의 144mm인 긴 변을 36mm씩 4등분한다.
- b) 각 4등분 선을 따라 칼로 불지 위에 절개를 넣고 찢기 쉽게 한다.
- c) 불지를 접어 양 끝을 검은 테이프로 붙이고 사진기 몸체를 만든다.
- d) 알루미늄박 중앙에 바늘로 아주 작은 바늘구멍을 만든다.
알루미늄박은 딱딱한 평면 위에 놓고 바늘 끝으로 가볍게 구멍을 낸다.
- e) 바늘구멍이 개구부의 중앙에 오도록 알루미늄박을 불지(B)의 위에 놓고 각 변을 테이프로 붙인다.
- f) 25mm의 검은 종이를 바늘구멍 위에 씌우고 그 위 끝을 테이프로 붙인다.
- g) 바늘구멍이 붙은 불지(B)와 상자를 테이프로 서로 붙인다. 완전히 차광하기 위해 테이프를 충분히 사용하여 각 모서리를 서로 붙이도록 한다.
- h) 이렇게 만든 사진기 박스와 필름 카트리지를 조합시킨다. 여기에서도 완전히 차광하고 확실히 조합시킨다.
- i) 필름 카트리지와 사진기 박스를 조합시켰으면 고무밴드로 단단히 고정한다.
- j) 준비한 동전을 세로로 하여 필름 카트리지의 스펀 머리부분에 끼워 넣는다.
- k) 동전을 반시계 방향으로 돌리고 필름을 끼운다. 필름 카트리지의 백에는 차광기가 붙어 있고 여기에 필름 코마수가 표시되어 있으므로 카트리지의 뒷면에 있는 창으로부터 이 코마수를 보고 촬영매수를 확인할 수가 있다. 촬영을 시작할 때는 카트리지의 창에 3이나 4의 숫자가 나타날 때까지 동전을 돌려 세트해 둔다.

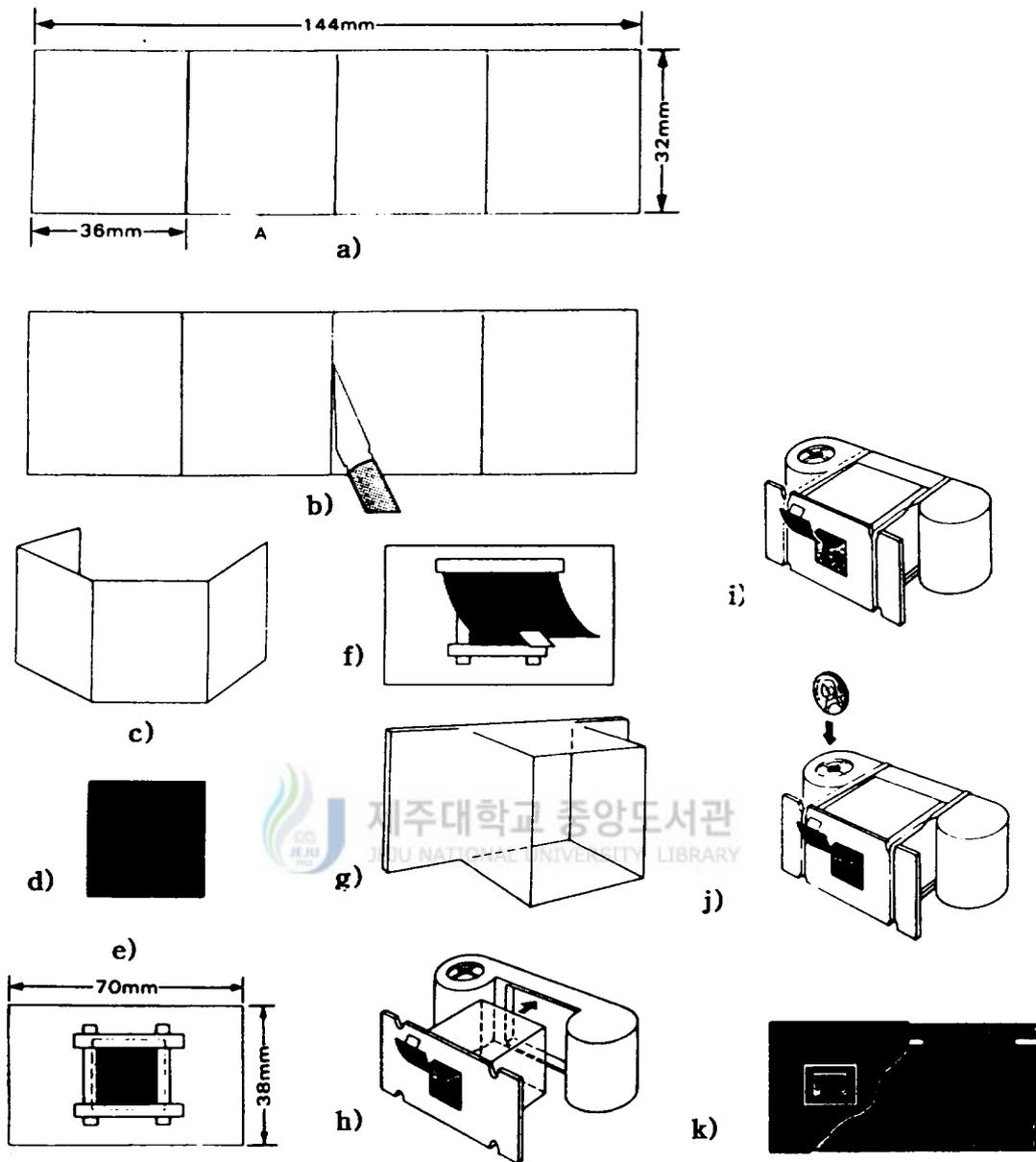


그림 16. 카트리지 식 바늘구멍 사진기 제작

2) 바늘구멍 제작

(1) 주변

바늘구멍의 주변은 요철이 없는 부드러운 원이 되어 있어야 한다. 주변이 들쭉날쭉하거나 요철이 있으면 상이 선명하지 않게 된다. 바늘구멍의 구경의 정밀도는 그 만큼 엄격할 필요는 없으나 바늘구멍이 너무 작으면 입사광이 회절현상을 일으켜 상이 흐려지거나 노출시간이 매우 길어지게 된다.

(2) 바늘구멍용 재료

바늘구멍은 상자나 캔으로 직접 만들 수 있다. 그러나 다른 재료에 바늘구멍을 뚫어 두고 그것을 사진기 박스 개구부에 테이프로 붙이는 편이 간단하고 능숙하게 만들 수가 있다. 재료로서는 튼튼한 알루미늄박 1회용 파이프접시, 필름의 차광지 등이면 되는데 두께 0.4mm 정도의 알루미늄이나 신주의 얇은 판 재료를 사용하면 더욱 좋다. 이 얇은 판재료는 철물점이나 슈퍼에서 구입할 수 있다.

(3) 바늘 사용법

직경 0.56mm, 0.85mm, 0.95mm, 1.00mm, 1.50mm의 바늘을 사용하여 바늘구멍의 직경을 구하였다. 바늘구멍의 주변을 평평하게 하기 위해 불에 달군 바늘을 회전시키면서 종이 또는 금속판에 반정도 까지 끼워 넣는다. 또 알루미늄박이나 종이를 2장의 얇은 불지에 끼워 구멍을 내면 바늘구멍은 평형하고 둥글게 된다.



(4) 제작

그림 17은 바늘구멍 제작 과정을 나타낸 것이다.

- a) 종이 또는 호일에 바늘로 구멍을 낸다. 재료를 얇은 카드로 끼우면 종이나 호일이 찢어지기 어렵게 되어 주변의 들쭉날쭉도 적어진다.
- b) 딱딱한 판에 얇은 금속판을 대고 구멍을 낸다.
- c) 송곳을 돌려서 뚫으면 구멍이 평평하게 된다.
- d) 들쭉날쭉한 것은 샌드페이퍼나 벙가라 (산화철(III)을 갈아내는 가루)로 가볍게 문지른다.

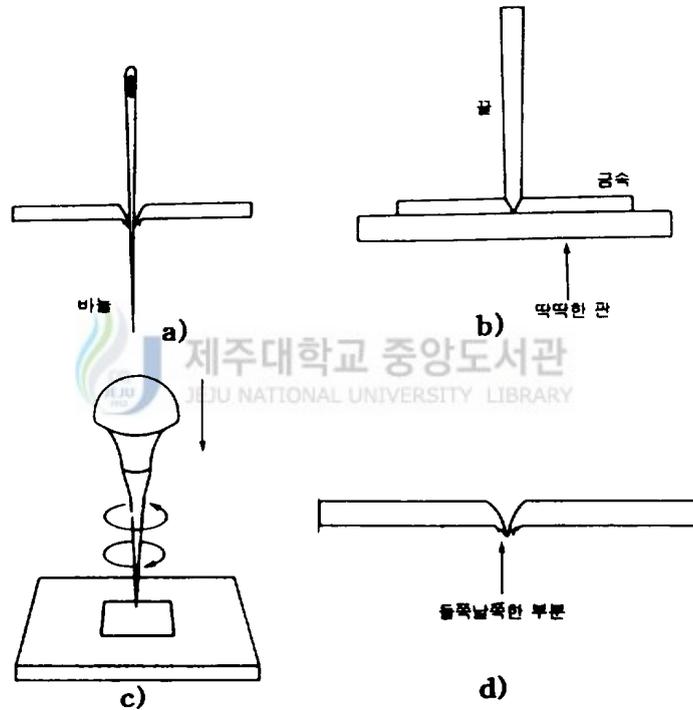


그림 17. 바늘구멍 제작 과정

2. 실험 및 결과 분석

1) 바늘구멍에 의한 상 실험

실험을 위해서 카트리지 식 바늘구멍 사진기를 제작하여 사용하였는데 필름 교환의 어려움, 거리조절 및 노출시간에 대한 여러 가지 문제가 있어 사용하지 않았다. 그 대신 SMC PENTAX 50mm 사진기의 몸체를 사용하여 바늘구멍 사진기를 제작하였다. 광원으로는 광원인 동시에 피사체인 발광체로 풍로 (100V/500W)와 전자계산기를 사용하였고, 바늘구멍 사진기를 고정시키기 위해 삼각대를 사용하였다. 0.56mm, 0.85mm, 0.95mm, 1.00mm, 1.50mm인 바늘의 직경을 사용하여 1회용 알루미늄박에 바늘구멍을 뚫었다.

피사체와 바늘구멍사이의 거리는 180cm 정도이고 바늘구멍과 필름사이의 거리는 4.5cm로 하였다. 사진 필름은 Kodak ASA 400을 사용하였고, 노출시간은 암실 작업용 야광 시계를 사용하여 60초로 하였다. 이 과정에 대한 실험 장치의 구성을 그림 18에 나타내었다.

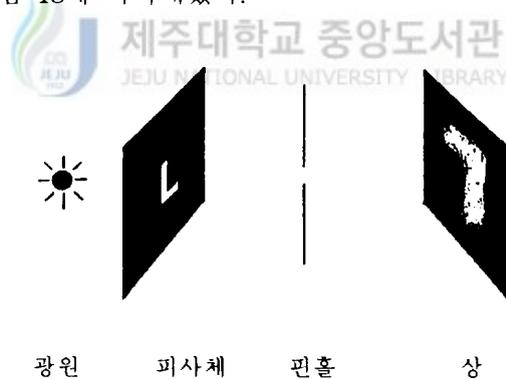


그림 18. 바늘구멍에 의한 상 실험 장치도

(1) a/b 의 비율에 따른 상

발광체와 바늘구멍 사이의 거리 a 와 바늘구멍과 상 사이의 거리 b 에 따른 a/b 의 비율로 상의 성질을 고찰하였다. 여기서는 $a/b = 1$ ($a = 5\text{cm}$, $b = 5\text{cm}$)인 경우와 $a/b = 1/2$ ($a = 2.5\text{cm}$, $b = 5\text{cm}$)인 경우에 나타나는 상을 고찰하였다. 그림 19에서 $a/b = 1$ 인 경우, 상의 크기는 발광체의 크기이고, $a/b = 1/2$ 인 경우는 발광체의 2배를 얻는다.

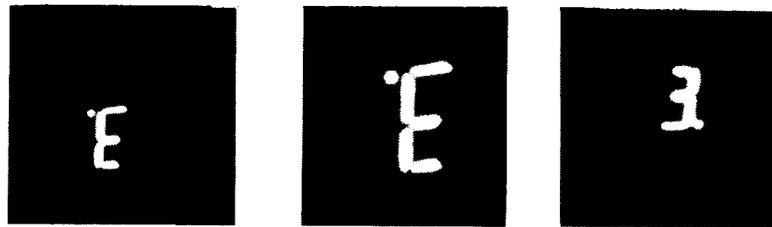
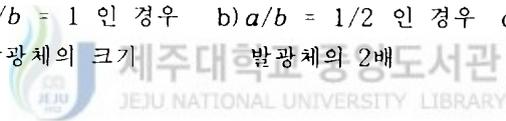


그림 19. a) $a/b = 1$ 인 경우 b) $a/b = 1/2$ 인 경우 c) 실물의 발광체
발광체의 크기 발광체의 2배



(2) 바늘구멍의 개수에 대한 상

위 실험은 바늘구멍 1개(직경 0.56mm), 바늘구멍 2개(직경 0.56mm 와 0.85mm), 바늘구멍 3개(직경 0.56mm 2개와 0.85mm 1개), 바늘구멍 4개(직경 0.85mm)를 발광체와 상면 사이에 놓았을 때 나타나는 상을 고찰하였다. 그림 20에서 보는 바와 같이 각각의 경우에 대해 바늘구멍의 수에 따라 상의 수도 같은 도립상을 형성하였다. 다만 바늘구멍이 큰 경우가 바늘구멍의 작은 경우에 비하여 밝은 것을 보면 상은 바늘구멍을 통하여 들어오는 빛의 양

과 관계가 있음을 알 수 있다.

바늘구멍이 2개인 경우를 광선 도식으로 그림 21에 나타내었다.



a)

b)

그림 20. 바늘구멍 개수에 따른 상

a) 바늘구멍 2개(직경 0.56mm 와 0.85mm)

b) 바늘구멍 3개(직경 0.56mm 2개와 0.85mm 1개)

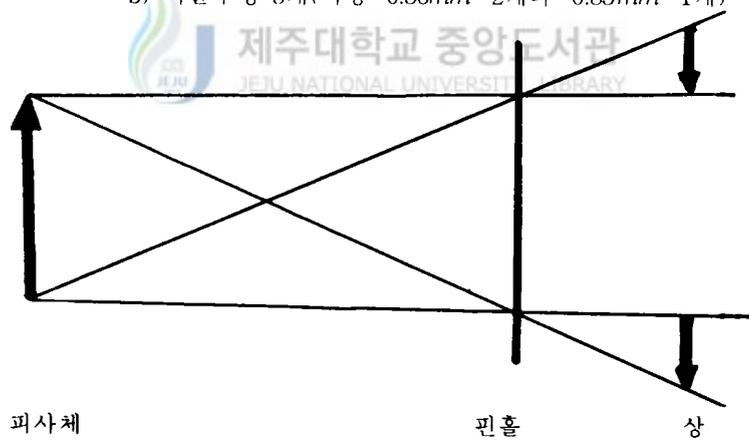


그림 21. 바늘구멍 2개가 2개의 도립상을 형성하는 광선 도식

(3) 바늘구멍 크기에 따른 상

바늘구멍의 크기를 0.56mm , 0.85mm , 0.95mm , 1.00mm , 1.50mm 하여 나타나는 상을 고찰하였다. 그림 22에서 바늘구멍의 크기가 0.56mm 일 때 가장 선명한 상을 형성함을 알 수 있었다. 다만 바늘구멍의 크기를 0.56mm 이하로 줄일 수가 없어 광선 광학 영역에서 파동 광학영역으로 옮겨가는 회절 현상(상이 어둡고 흐릿한 현상)을 관찰할 수 없었다. 바늘구멍이 클수록 빛의 양이 많이 통과되어 밝아질 뿐 선명한 상을 형성하지는 않았다.

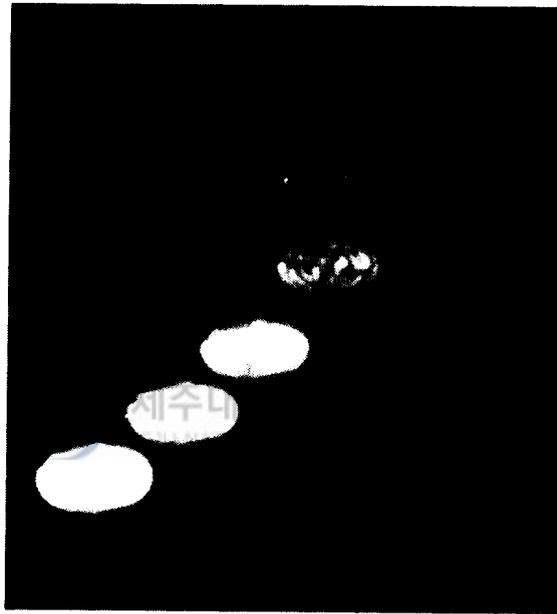


그림 22. 바늘구멍 크기에 따른 상의 선명도

2) 슬릿에 의한 상 실험

여기서는 모든 조건을 바늘구멍 대신 슬릿을 사용한다는 것만 제외하고는 바늘구멍에 의한 상 실험과 같게 하였다. 슬릿은 시중에 나온 도르코 면도칼을 사용하여 제작하였다.

(1) 슬릿의 간격에 따른 상

슬릿의 간격에 따라 상의 선명도가 어떻게 나타나는지를 알아보기 위하여 피사체와 슬릿사이의 거리를 130cm , 삼각대의 높이를 74cm 에서 슬릿의 간격을 0.5mm , 0.8mm , 1.0mm , 1.5mm 로 하여 60초 동안 노출시켜 촬영하였다.

결과는 그림 23에서 바늘구멍과 마찬가지로 슬릿의 간격이 작았을 때 가장 선명한 상을 형성하였다.

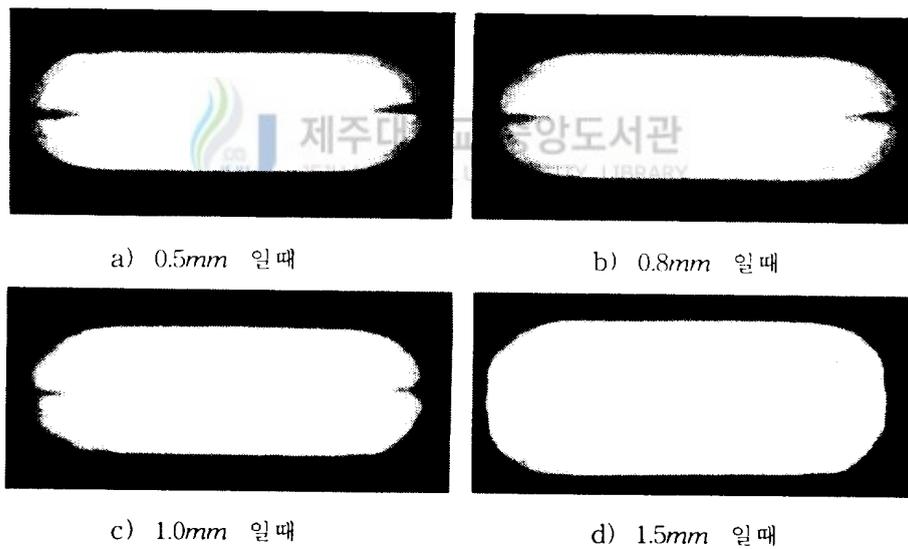


그림 23. 슬릿의 간격에 따른 상의 선명도

(2) 슬릿과 피사체의 거리에 따른 상

이 실험은 슬릿의 간격을 0.5mm 로 일정하게 하여 거리 50cm , 100cm , 150cm , 200cm , 250cm 를 30초동안 노출시켜 촬영하였다.

그림 24에서 보는 바와 같이 슬릿과 피사체의 거리가 멀 수록 스크린에 맺히는 상의 크기는 작음을 확인할 수 있었다. 즉, 피사체로부터 슬릿까지의 거리가 2배가되면 상은 $1/2$ 이 되었고 거리가 3배이면 $1/3$ 이 되었다.

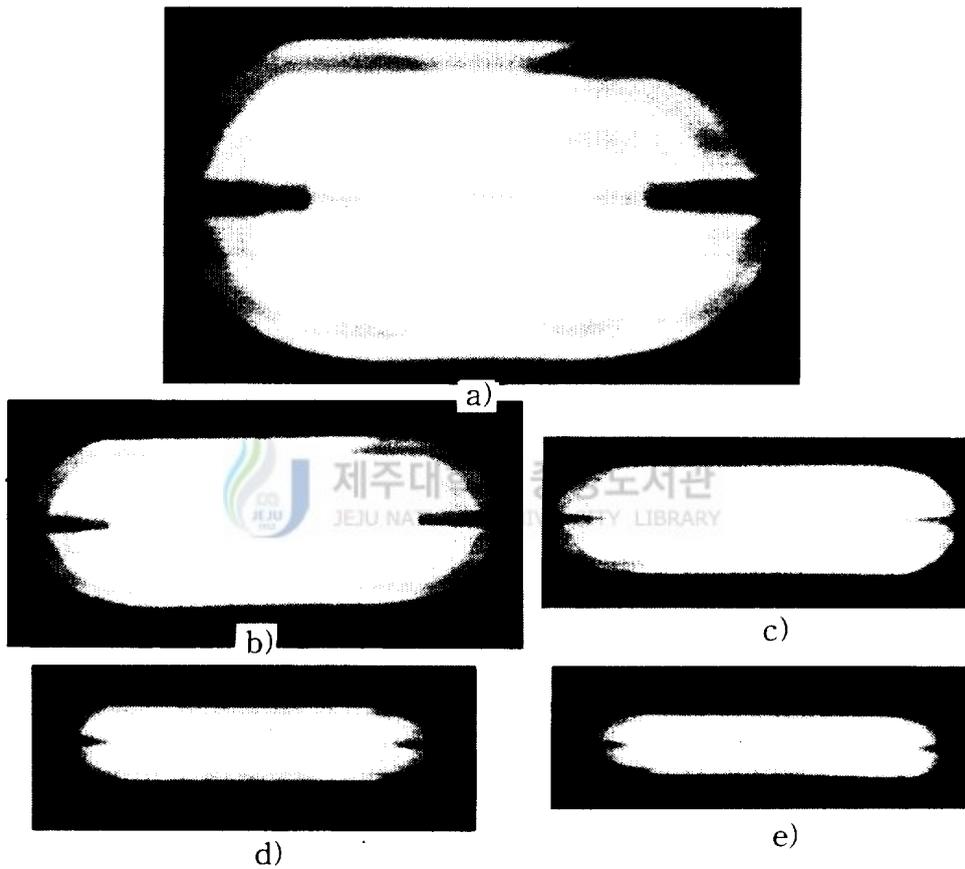


그림 24. 슬릿과 피사체의 거리에 따른 상

a) 50cm b) 100cm c) 150cm d) 200cm e) 250cm

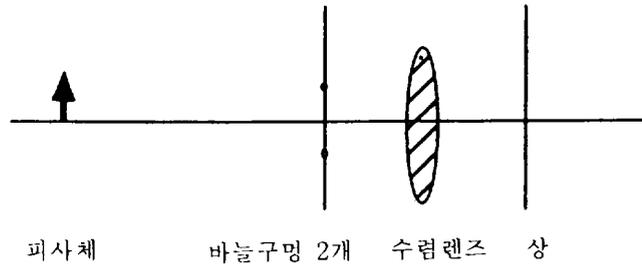
3) 수렴렌즈, 바늘구멍, 슬릿에 의한 상 비교 실험

수렴렌즈에 의한 상 실험(이하 A 실험이라 함) 장치로는 발광체인 풍로 (100V/500W), 50mm 수렴렌즈, 그리고 상인 Kodak ASA 400인 필름으로 구성된다. 바늘구멍에 의한 상 실험(이하 B 실험이라 함) 장치로는 수렴렌즈 대신 알루미늄박에 여러 개의 바늘구멍과 여러 모양(' '자, '二'자, '三'자, '十'자, 'L'자 모양)의 슬릿을 사용한다. 발광체와 수렴렌즈 사이에 B 실험에서 사용한 바늘구멍이나 슬릿에 의한 상 실험(이하 C 실험이라 함) 대한 장치를 그림 25. a)에 나타내었다.

A 실험의 결과는 화살의 각 점(점 a, b)에서 발산하는 빛은 수렴렌즈에 의해 다른 점 (점 a', b')으로 모아진다.

B 실험의 결과는 발광체 위의 점 a 는 점 a' 에 점 b 는 점 b' 으로 되어 도립상을 형성한다. 2개의 바늘구멍은 2개의 도립상을, 3개의 바늘구멍은 3개의 발광체에 대한 도립상을 형성한다. 여러 모양의 슬릿에 대해서도 여러 모양에 대한 도립상을 형성한다. 예를 들어, '二'자 모양은 '三'자 모양으로 나타난다.

C 실험의 결과는 발광체 위의 점 a 는 점 a' 으로 점 b 는 점 b' 에 도립상을 형성한다. 즉 실험 A의 결과와 같다. 이 실험에서 1개의 바늘구멍보다는 2개의 바늘구멍의 경우가, 바늘구멍보다는 슬릿의 경우가 더 밝은 상을 형성하는 것으로 보아 바늘구멍이나 슬릿에서 빛의 양이 조절되어 바늘구멍이나 슬릿을 통과한 빛만이 수렴렌즈를 통해 상을 형성한다는 사실을 알 수 있다. 다시 말해, 바늘구멍이나 슬릿은 단지 빛의 양을 조절하는 역할에 지나지 않음을 알 수 있었다.



a)



b)



c)

그림 25. 수렴렌즈, 바늘구멍, 슬릿에 의한 상 비교

a) C 실험 장치도 b) B 실험에 대한 도립상 c) C 실험에 대한 도립상
 (바늘구멍 4개인 경우) (바늘구멍 4개인 경우)

4) 슬릿의 각도에 따른 상의 일그러짐

이 실험을 위한 장치로는 발광체인 풍로, ' '자 모양의 슬릿 2개, 그리고 상면인 필름(Kodak ASA 400을 60초 동안 노출시킴)이 필요하다. 삼각대의 높이는 120mm로 하였다. 슬릿의 모양과 슬릿의 간격을 다양하게 할 수 있는데, 여기서는 단순한 상을 형성하기 위해서 ' '자 모양의 두 슬릿을 사용하였다. A 슬릿과 B 슬릿 사이의 거리 $s_1 = 10\text{ cm}$, 발광체와 상면까지의 거리 s_2 는 194.5cm 로 하였다. 위 실험 장치는 그림 26에 나타내었고, 실험의 순서는 다음과 같다.

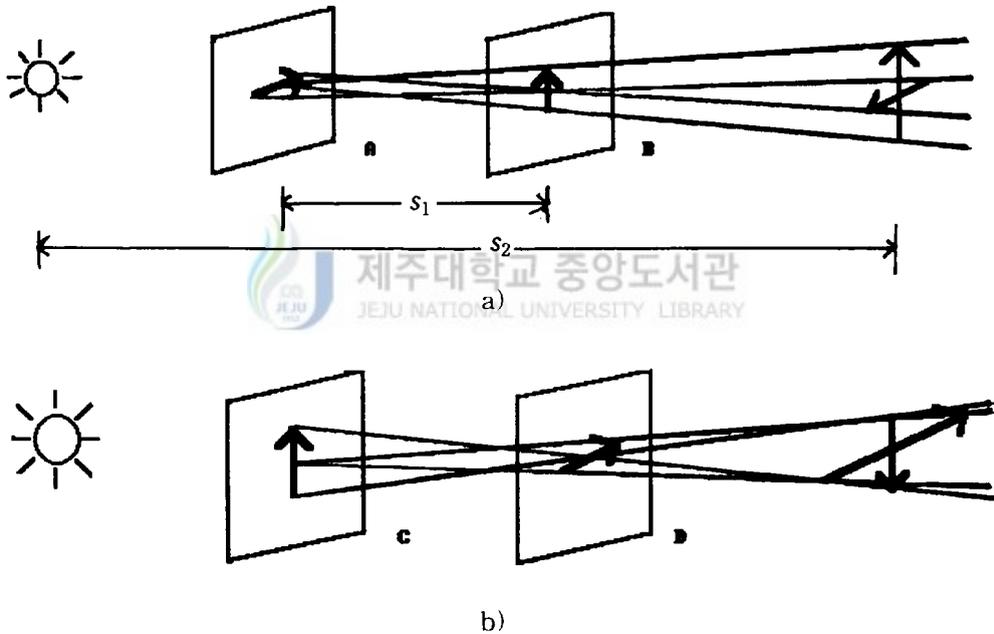


그림 26. 슬릿의 각도에 따른 상의 일그러짐에 대한 장치도

(1) 슬릿 A와 슬릿 B를 a)와 같이 놓았을 때 나타나는 상을 고찰하였으며, 슬릿 A는 그대로 슬릿 B를 시계 방향으로 약 45° , 90° , 135° 기울여 놓았을 때 나타나는 상을 고찰하였다.

(2) 슬릿 C와 슬릿 D를 b)와 같이 놓았을 때 나타나는 상을 고찰하였으며, 슬릿 D는 그대로 두고, 슬릿 C를 시계방향으로 약 45° , 90° , 135° 기울여 놓았을 때 나타나는 상을 고찰하였다.

위 실험 결과는 a)의 경우 상의 세로선의 광선은 슬릿 A를 보통의 구멍을 통과하듯이 빠져 나오고 슬릿 B는 이 광선의 진로를 조금도 바꾸지 않는다. 따라서 수직한 선의 상은 슬릿 A에서 상까지의 거리에 대응하는 크기로 얻어진다.

수평한 선에 있어서는 슬릿 B에 도달할 때까지 방해받지 않고 그대로 진행하다가 슬릿 B에서는 바늘구멍을 통과하는 것과 같은 식으로 이 슬릿을 빠져나가서 슬릿 B에서 상까지의 거리에 대응하는 크기의 상을 형성한다.

이것을 정리해서 말하면 수직한 선에 있어서는 정확히 A의 슬릿만이, 또 수평한 선에 있어서는 반대로 B의 슬릿만이 존재한다. 그래서 A의 슬릿은 B의 슬릿보다 상으로부터 멀리 떨어져 있으므로 수직한 선의 전체 길이는 수평한 선보다 큰 길이로 상이 형성된다. 즉 상은 정확히 수직방향으로 늘어나게 된다. 각각의 결과에 대한 상은 그림 27. a)에 나타내었다.

반대로 그림 27. b)의 경우는 수평방향으로 잡아 늘여진 상이 얻어진다. 그림 27. c, d, e)경우는 슬릿 A는 그대로 슬릿 B를 시계 방향으로 약 45° , 90° , 135° 기울여 놓았을 때 나타나는 상이다. 그림 27. f, g, h)의 경우는 슬릿 D는 그대로 두고, 슬릿 C를 시계 방향으로 약 45° , 90° , 135° 기울여 놓았을 때 나타나는 상이다.

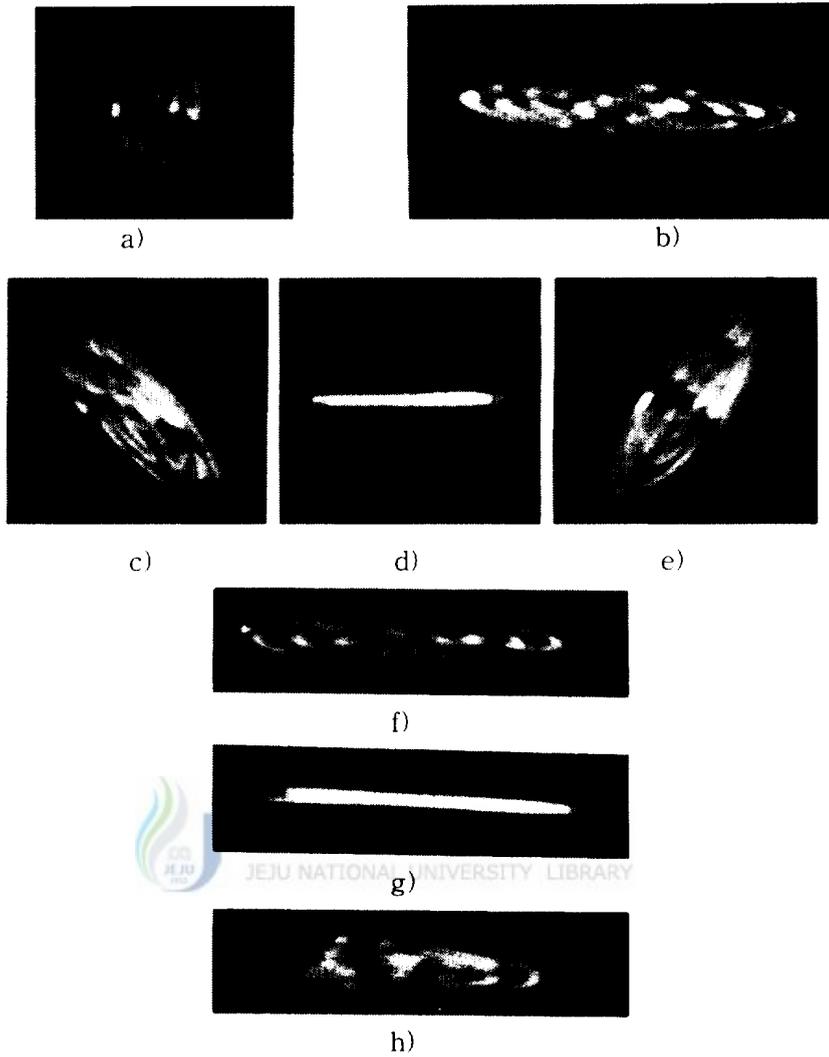


그림 27. 슬릿의 각도에 따른 상의 일그러짐

a) 그림 26. a)에 나타난 상 b) 그림 26. b)에 나타난 상 c, d, e) 그림 26. a)에서 슬릿 B를 시계 방향으로 약 45° , 90° , 135° 기울여 놓았을 때 나타난 상
 f, g, h) 그림 26. b)에서 슬릿 C를 시계 방향으로 약 45° , 90° , 135° 기울여 놓았을 때 나타난 상

IV. 결 론

바늘구멍 사진기는 렌즈 대신에 빛을 통과시키는 바늘구멍이 있고 피사체의 반사광을 받아들여 상을 형성한다. 상의 크기는 바늘구멍으로부터 상면까지의 거리로 결정되며, 이 거리가 고정된 상의 크기는 바늘구멍으로부터 피사체의 거리로 결정됨을 알 수 있었다. 그리고 렌즈를 사용했을 때만큼 선명한 상을 얻을 수 없었으나, 피사체 심도가 무한히 되므로 화각내의 피사체를 모두 같은 선명함으로 찍을 수 있었다.

바늘구멍을 통과하는 광량이 적기 때문에 노출시간은 통상 수 초에서 수 분이 필요했다. 노출 중에는 사진기를 절대 움직이지 않도록 고정시켰다.

바늘구멍에 의한 상 실험의 경우,

첫째, 발광체와 바늘구멍 사이의 거리 a 와 바늘구멍과 상 사이의 거리 b 에 따른 a/b 의 비율이 1인 경우와 $1/2$ 인 경우의 상을 고찰하였다. 결과는 $a/b = 1$ 인 경우, 상의 크기는 발광체의 크기이고, $a/b = 1/2$ 인 경우는 발광체의 2배 가됨을 알 수 있었다.

둘째, 바늘구멍의 개수에 따른 상이 어떻게 나타나는지를 촬영하였다. 결과는 바늘구멍의 수에 따라 같은 개수의 도립상이 형성됨을 알 수 있었다. 또한, 바늘구멍이 큰 경우가 바늘구멍의 작은 경우에 비하여 선명하지 않고 밝은 것은 빛의 회절현상과 바늘구멍을 통하여 들어오는 광량과 관계가 있음을 알았다.

셋째, 바늘 직경이 $0.56mm$, $0.85mm$, $0.95mm$, $1.00mm$, $1.50mm$ 인 바늘구멍을 만들어 나타나는 상을 고찰하였다. 결과는 바늘구멍의 크기가 $0.56mm$ 일 때, 가장 선명한 상을 형성하였고, 이는 바늘구멍이 식 (8)에서 같이 $0.036\sqrt{L}$

일 때 가장 선명한 상이 맺히는 것을 알 수 있었다. 시료 제작상의 문제로 바늘구멍의 직경을 0.56mm 이하는 만들 수 없었는데 이는 앞으로 연구해야 할 과제이다.

슬릿에 의한 상 실험의 경우,

첫째, 슬릿의 간격에 따라 상의 선명도가 어떻게 되는지를 알아보기 위해 슬릿의 간격을 0.5mm , 0.8mm , 1.0mm , 1.5mm 로 하여 촬영하였는데 결과는 슬릿의 간격이 작았을 때 가장 선명한 상을 형성하였다.

둘째, 슬릿의 간격을 0.5mm 로 일정하게 하여 발광체와 슬릿 사이의 거리를 50cm , 100cm , 150cm , 200cm , 250cm 로 변화시켜 촬영하였다. 결과는 슬릿과 발광체의 거리가 멀 수록 상의 크기가 작음을 알 수 있었다.

셋째, 여러 개의 바늘구멍(또는 여러 형태의 슬릿)만 놓고 실험한 상과 발광체와 수렴렌즈 사이에 여러 모양의 바늘구멍을 놓고 촬영하였을 때 나타나는 상을 비교 설명하였다. 결과는 3개의 바늘구멍만을 사용한 경우는 3개의 바늘구멍 상을 형성하였고, 발광체와 수렴렌즈 사이에 3개의 바늘구멍을 놓았을 때는 1개의 바늘구멍 상만을 형성하였다. 이는 3개의 바늘구멍을 통해 들어온 광량이 수렴렌즈에 의해 모아져 하나의 상을 형성하였다는 사실로 알 수 있다. 또한 바늘구멍이 큰 경우는 통과하는 광량이 많아 수렴렌즈를 통해 모아진 상이 밝음을 확인할 수 있었다. 여러 형태의 슬릿인 경우도 슬릿만 사용한 경우는 그 모양의 도립상을 형성하였지만, 발광체와 수렴렌즈 사이에 놓았을 경우에는 슬릿의 모양에 상관없이 발광체의 모양(풍로) 그대로 상을 형성하였다.

두개의 슬릿을 여러 각도에 따라 비스듬히 배치해 놓고 나타나는 상의 일그러짐을 관찰하였는데 이들에 대한 광선도식은 앞으로 해야 할 과제이다.

참 고 문 헌

1. 사진백과편찬위원회, 사진대백과사전, Vol.8, 지다리, pp.16~23 (1994).
2. E. Hecht, *Optics* Addison-Wesley, Reading, MA, pp.198 (1987).
3. D. J. Lowell, *Optical Anecdotes* Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers pub., Washington, DC, pp.8 (1981).
4. E. Mach, *The Principles of Physical Optics* Dover, New York, (1926).
5. M. Young, *Appl. Opt.*, **10**, pp.2763 (1971).
6. D. Bissonnette, P. Rochon, & P. Somers, *Phys. Teach.*, **29**, pp.21 (1991).
7. M. Young, *Phys. Teach.*, **27**, pp.648 (1989).
8. G. Jakovidis, *Phys. Teach.*, **31**, pp.500 (1993).
9. J. E. Stewart, *Phys. Teach.*, **29**, pp.520 (1991).
10. 바바라 런던 업턴, 사진, 미진사, pp.57~63 (1994).
11. D. Halliday, D. & R. Resnick, *Fundamentals of Phys.*, 교학사, pp.1006~1072 (1994).
12. 이상수, 기하광학, 교학연구사, pp.6~53 (1993).
13. 김태한, 사진학, 영진출판사, pp.44~57 (1986).
14. Karl C. Mamola, *Phys. Teach.*, **21**, pp.332 (1983).
15. R. D. Edge, *Phys. Teach.*, **27**, pp.392 (1989).
16. David R. Lapp & Janes E. Keenan, *Phys. Teach.*, **29**, pp.502 (1991).
17. David Falk, Dieter Brill, & David Stork, *Photography, Color, Vision & Holography* Harper & Row, New York, (1986).
18. See, e.g., R.S. Longhurst, *Geometrical and Physical Optics* 2nd ed., Wiley, New York, (1967).

-
19. E. W. H. Selwyn, Phot. J. **90B**, pp.47 (1950).
 20. 김현식, 동아원색세계대백과사전, 동아출판사, **29**, pp.444 (1992).
 21. M. Young, Am. J. Phys., **40**, pp.715~720 (1972).



<Abstract>

**An Investigation of the Properties of Light
using the Pinhole Camera**

Lim, Kwan-Uk

Physics Education Major

Graduate School of Education, Cheju National University

Cheju, Korea

*Supervised by Professor **Park, Kyu-Eun***

The properties of light can be studied by using the pinhole camera made simply.

In the pinhole imaging experiment, the size of image is determined in the ratio of the distance between an illuminant and pinhole to the one between pinhole and image. The number of formed upside down image is the same as that of pinholes.

In the slit imaging experiment, an interval of slits determines the sharpness of image. The farther the distance between an illuminant and

* A thesis submitted to the Committee of the Graduate School of Education, Cheju National University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Education in August, 1995.

slit is, the smaller the size of image is, if an interval of slits is fixed.

Two images are compared, one of which is formed through the only pinholes and the other of which through the pinholes placed between an illuminant and a convergent lens.

There are different distortions of image as two slits are placed at different angles.

