

태양광 채광시스템의 스펙트럼 분석

(Spectral Analysis of Sunlight Collector System)

박준석^o · 이익수 · 여인선

(Jun-Seok Park^o · Ik-Soo Eo · In-Seon Yeo)

Abstract

Sunlight Collector System is a new way to make sunlight available to living things. It transmits sunlight through fiber optics to wherever it needs. It applies the artificial lighting, underground lighting, intelligent building, museum lighting, restoration-room to health etc. Cutting out most of the ultra-violet and infra-red radiation.

In this paper, we measured the spectrum analysis of sunlight and Sunlight Collector System's light. Also, we found out the distance to get visible light.

1. 서론

급속한 산업사회의 발전으로 인한 도시의 과밀화 현상과, 자연 환경이 변화되어 가면서 급기야 일조권에 대한 문제를 야기하게 되었다. 이러한 문제의 해결방안으로써 태양광을 실내로 끌어오는 방안을 모색하게 되었으며, 이러한 방법 중에서도 태양광 채광시스템에 의한 방법을 살펴 본다. 이 시스템은 태양광 중 인체에 유해한 자외선이나 적외선을 제외한 단지, 가시광만을 광파이버를 통해 전송한다[1].

태양광 채광시스템은 태양광을 채광하기 위해 자동 추적 채광부를 갖춘 시스템이다. 이 시스템은 피부암·홍반 발생·백내장의 원인인 자외선, 적외선을 제외한 가시광만을 조사하기 때문에 안전하고 인간과 친숙한 태양광이기 때문에 실내 조명용으로 사용한다면 최적의 조명환경을 누릴 수 있다. 또한, 이 광의 장점은 연색성이 뛰어나며 식물재배에도 효과적이고 그 외에도 Intelligent Building, 주택조명, 박물관·미술관·특수환경의 연구실, 지하실 조명, 실내 일광욕, 식물원, 수족관 등 다양한 응용 분야로 사용이 확대 되고 있다.

본 논문에서는 태양광의 스펙트럼과 태양광 채광시스템에서 집광하여 전송한 광의 스펙트럼을 비교 분석하여 가시광만을 집광 전송하는지 검증하고자 하며, 렌즈와 광파이버간에 가시광만을 받아들이는 최적의 거리를 구하고자 하였다.

2. 태양광 채광시스템의 구성

태양광 채광시스템의 구성은 크게 태양광을 집광하는 집광부와 최적의 집광을 위해 태양과 수직을 이루기 위한 태양광 추적장치와 집광된 광을 조사부로 전송하기 위한 전송부와 전송된 광을 분사하는 조사부로 이루어지며, 구성도는 그림 1과 같다[2].

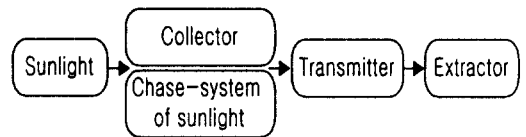


그림 1. 태양광 채광시스템의 구성

Fig. 1. Structure of sunlight collector system's

2.1. 채광부

태양광이 볼록렌즈를 지나면 고밀도로 집광된 한점을 이룬다. 집광점의 위치 선정시에는 각 표면마다 일어나는 굴절율과 집광점 거리, 렌즈 굴절률, 렌즈 각 표면의 곡률 반경을 고려하여 얻을 수 있다.

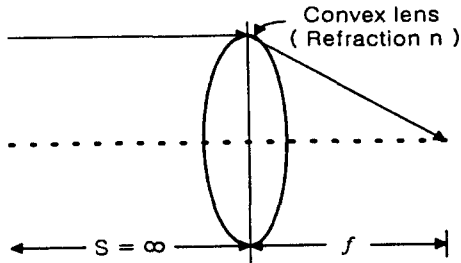


그림 2. 렌즈의 2면에서의 굴절
Fig. 2. Reflection of len's two face

S를 무한대에 위치한 태양의 거리라고 하고 상거리를 f 라고 하면, 아래와 같이 렌즈-제작자의 공식 (lens-maker's equation)을 이용하여 집광점 거리를 구한다[3].

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

여기서,

f : 집광점 거리

n : 렌즈 굴절률

$r_1 r_2$: 렌즈 각 표면의 곡률반경

그림 3은 색수차를 이용한 태양광의 분리를 나타낸 그림으로 집광된 고밀도의 태양광이 볼록렌즈를 통과하면 색수차를 나타내게 되어 광이 분광 되며 분광된 광 중에서 가시광만을 집광 하면 된다. 그러나, 렌즈를 통과하여 맺어지는 피사체의 상은 완전한 상으로 결상 되기 어렵다. 즉, 상은 변형되거나 선명도가 떨어지고 색이 번지는 등의 결함을 갖게 된다. 이러한 결상의 결함을 수차(aberration)라고 하며, 색수차는 거울의 경우에는 생기지 않고, 렌즈의 경우에만 생기는데 식(1)에 의하면 렌즈의 초점거리는 파장에 의한 굴절률 변화에 따라 변한다. 굴절률은 그림 3에서 처럼 적외선 보다 자외선의 경우 약간 더 크므로 적외선 보다 자외선의 경우 초점 거리가 더 짧다. 이와 같이, 태양광이 파장에 따라 굴절률이 다른 점을 색수차(Chromatic aberration)라 하며, 이를 이용하면 가시광선보다 파장이 짧은 1[nm]~380 [nm]까지의 화학, 살균 및 형광작용을 하는 자외선과 가시광 보다 파장이 긴 760[nm]~1[mm]까지의 온열 효과의 특성을 갖는 적외선을 제외한 380[nm]~760[nm]까지의 가시광만을 분리해 낼 수 있다.

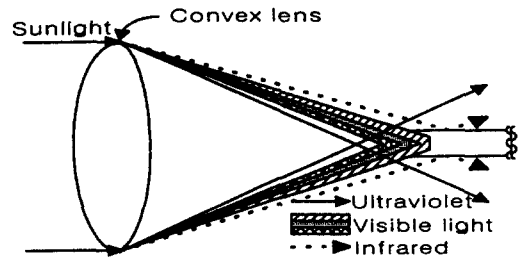


그림 3. 색수차를 이용한 태양광의 분리
Fig. 3. Spectral selection utilizing chromatic aberration

2.2. 태양광 추적 장치

태양광 추적장치는 최적의 태양광을 집광하기 위해서 매우 중요한 역할을 하고 있는데, 태양광을 받아들이는 집광장치 전면부가 항상 수직을 이루고 있어야만 한다. 그러나, 지상에서 본 태양의 위치는 지구의 자전, 공전 때문에 시시각각 변화하여 추적장치를 설치할 필요가 있다. 추적 제어부는 태양의 움직임에 따라 채광부를 추적 구동 시키는 것으로, 서보 모터 2개를 이용하여 태양의 위치 변화에 따라 수평방향과 수직방향으로 나누어 제어 한다. 추적 구동의 제어방식으로는 광센서만을 사용하는 방식과, 광센서와 프로그램 내장방식의 병용방식이 있어, 용도나 사용 조건에 따라 선택된다. 광센서 방식만을 사용하는 방식은 거시적 추적기와 미시적 추적기로 구성되며 거시적 회전으로 어느 정도의 위치로 이동 후 미시적 회전으로 최적의 위치가 설정된다. 광센서 방식의 추적제어 소자로는 Si Photo Cell을 태양 위치 검출 센서를 주로 사용한다. 프로그램 내장 방식은 마이크로 컨트롤러를 이용하여 날짜와 시간에 따른 태양의 위치 변화 좌표를 프로그램화하고 이를 내장하여 자동적으로 작동을 정지하거나 또는 태양의 위치를 계산하여 추적한다.

2.3. 전송부

전송부는 광파이버에 집광된 가시광이 전반사를 반복하여 끝단으로 조사된다[4].

(1) 유도의 원리: 광파이버에 있어서 빛의 유도는 전체 내부전반사의 원리를 이용한다. 빛이 입력시 굴절률이 높은 매질 n_1 에서 더 낮은 매질 n_2 로 진행하면, 빛이 굴절되기보다는 오히려 반사가 된다, 이 과정을 내부전반사(Total internal reflection)라고 한다. 이는 데카르트의 법칙(Descartes's law)을 이용한다.

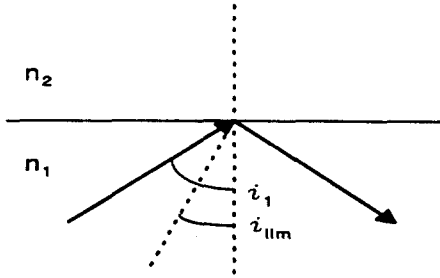


그림 4. 전반사
Fig. 4. Total reflection

$n_2 < n_1$ 인 경우

$$i_{lim} = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

위 그림 4에서 처럼 $n_2 < n_1$ 일 경우, 첫번째 매질에서 입사각 i_1 과 같은 반사각을 이룬다. 만일, 두개의 매질이 완전히 투명하고 표면이 평면이면 어떤 손실도 없이 반사가 이루어진다. i_1 에서 i_{lim} 까지 입사각은 식(2)에서 각각의 굴절율을 대입하여 얻을 수 있다.

(2) 광파이버의 구조: 광파이버의 구조는 그림 5와 같이 높은 굴절률 n_1 을 갖는 중심부분과 낮은 굴절률 n_2 을 갖는 외장부분, 그 외장 부분을 보호하는 보호막부분으로 이루어져 있다. 보호막은 외부의 충격이나 운전 중 표면의 품질 저하를 피하기 위해서 사용된다. n_1 과 n_2 의 물질은 투명하고 유기적인 매체로 되어 있으며, 대부분의 경우 그 중심 직경은 0.25~3.00[mm] 정도이다.

(3) 빛의 유도: 그림 5와 같이 광선의 방향이 M이라고 표시된 한 점으로 나아가면 굴절률 $n_2 < n_1$ 에 의해서 광선은 전반사 되어 다시 코어 부분으로 돌아간다. 이와 같은 반사는 광선의 초기 기울기 값이 식(3)의 부등식을 만족해야 한다.

$\theta < \theta_{lim}$ 경우

$$\theta_{lim} = \cos^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3)$$

이 경우 광선은 기울기 θ 를 유지하면서 내부 전반사를 계속해 나아간다. 이와 같이 광파이버 내에서 충분히 작은 각도로 기울어진 광선은 같은 평면에서 지그재그 경로를 따라 전반사를 이룬다.

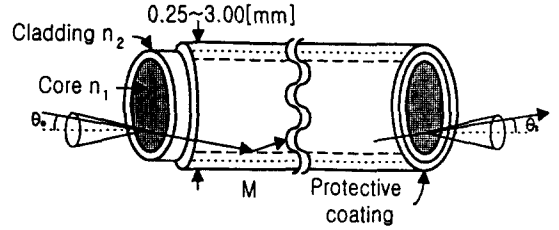


그림 5. 광파이버의 구조
Fig. 5. Structure of a fiber optic

(4) 빛의 입사와 방사: 광파이버는 내부에서 빛을 만들 수 없고 단지, 외부의 광원에서 광선을 입사하여 최대한 손실 없이 광을 전송하여 방사하도록 구성되어 있다.

$\theta_o < \theta_{max}$ 경우

$$\theta_{max} = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n_o} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) \quad (4)$$

여기서,

- θ_o : 수광각
- n_1 : 중심부분
- n_2 : 외장부분

식(4)에서 만약, 광원과 광파이버 사이의 중간 매질이 공기이면 $n_o=1$ 되고, $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 은 광섬유의 개구수 "Numerical Aperture"(NA)로 광파이버의 고유특성을 나타낸다. 또한, 광파이버 매질의 굴절률이 동일하다면 입사각 θ_o 의 각과 같은 축에서 θ_o 의 방사각으로 방사된다.

2.4. 조사부

전송된 가시광의 산광시에는 렌즈, 반사판, 각종 거울 등 이용하여 산광을 할 수 있으며, 조사각은 45°, 58°, 65° 등이 있다. 이 조사부의 밝기는 집광장치에 의해 1만배 정도로 집광되어 태양광을 광파이버 한 가닥으로 전송된다. 조사부에서는 이것이 각각 6가닥을 하나의 묶음으로 조사되는데, 조사광의 출력을 비교해 보면 60[W] 백열등의 광출력 이상으로 밝게 조사된다.

현재, 제품으로 생산되고 있는 L사의 태양광 채광시스템을 보면, 태양광이 9만8000[lx]일 경우에 표 1과 같은 광파이버 출력광 데이터를 나타낸다[5].

표 1. 광파이버 출력광

Table 1. Lighting fiber output

| | |
|-----------------|-----------|
| Lens dia. | 95[mm φ] |
| Core dia. | 1.0[mm φ] |
| Fiber length | 15[m] |
| Flux / 1Core | 272[lm] |
| Angle of output | 58° |

3. 실험 결과 및 고찰

태양광 채광시스템에서 렌즈를 통한 태양광이 집광 전송시 파장에 따라 서로 다른 굴절률의 변화를 나타내어 광이 분광 된다. 그렇다면, 분광된 광 중 어느 한 부분의 광만을 얻기 위해서는 광파이버 단면의 거리 조절을 하여 가시광만을 집광 전송 할 수 있는지, 분광 스펙트럼기인 Princeton Instruments Model ST-121를 사용하여 검증하고자 한다. 또한, 가시광만을 받아들이는 최적의 거리를 구하고자 한다.

측정일시는 1999년 10월12일 10시40분~11시40분까지이며, 실험장소는 전남대학교 공대 6호관 5층, 동경 126° 54', 북위 35° 10' 이다. 렌즈는 J사의 초점거리가 99[mm]인 렌즈이고 렌즈 외경은 100[mm φ]를 사용하였으며, 광파이버는 H사의 직경이 1[mm φ]이고, 광파이버 15[m]를 통하여 광을 전송하였다. 측정시 태양광은 9만 9000[lx], 구름이 없는 날을 선택하여 조사부를 고정하고, 300[mm] 떨어진 곳에 YOKOGAWA 510₂ 조도계를 사용하여 측정하였으며, 조사부에서 1000[mm] 떨어진 곳에 분광 스펙트럼 측정기를 설치하였다. 이 스펙트럼 분광기를 사용하여 광원의 광도와 스펙트럼에 대한 정확한 분석을 하고자 한다. 최대 광도는 15,000[lm]까지 측정 가능하다. 그러나, 적외선 파장대의 측정 범위가 적은 점에 한계가 있다. 30번의 스펙트럼 측정결과 99[mm] 영역대에서 높은 광도와 낮은 자외선 영역대를 나타냄을 알 수 있다.

그림 6은 렌즈를 거치지 않은 태양광의 스펙트럼 분석으로 가시광의 영역에서 최고점의 강도와 자외선 영역에서 최고점의 강도 비율과 렌즈를 통한 광의 각각의 강도 비율을 측정된 스펙트럼을 통하여 서로 비교하여 볼 때, 렌즈를 거치지 않은 태양광의 스펙트럼이 자외선 영역대에서 높게 나타내고 있다.

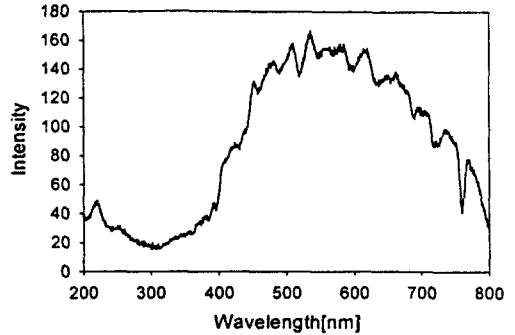


그림 6. 태양광의 스펙트럼 분석

Fig. 6. Spectral analysis of Sunlight

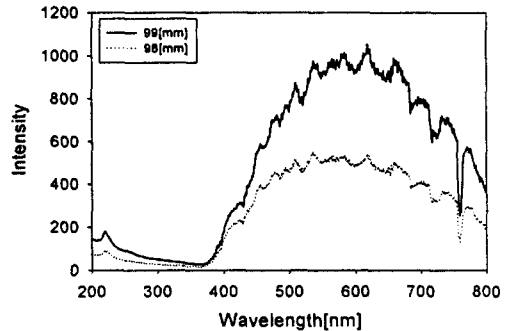


그림 7. 98, 99 [mm]에서의 스펙트럼 분석 (1차 측정)

Fig. 7. Spectral analysis for 98, 99 [mm] (1st-measured)

그림 7은 1차 측정에서는 렌즈와 접촉 단면 광파이버 간 거리가 99[mm]인 스펙트럼과 거리가 98[mm]인 스펙트럼을 비교해 볼 때, 1[mm] 간격을 두고 조사단의 분광 스펙트럼을 측정한 결과이다. 렌즈를 통한 광만을 서로 비교해 보면 가시광선의 강도가 증가하는 만큼 자외선의 강도도 증가 한다. 그러나, 강도값만을 비교해 보면 99[mm]의 최고점의 평균값이 1123.4이나, 98[mm]의 최고점의 평균값은 525.9으로 큰 강도 차이를 나타내고 있다.

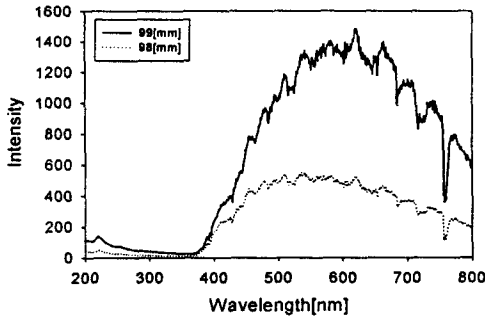


그림 8. 98, 99 [mm]에서의 스펙트럼 분석 (2차 측정)
 Fig. 8. Spectral analysis for 98, 99 [mm] (2nd-measured)

2차 측정시에도 1차 측정시와 유사한 분포비를 나타내었다. 그리고, 렌즈와 광파이버간 거리 설정시 육안으로 확인 불가능한 마이크로 단위는 설정의 어려움이 있었다.

태양광이 9만9000[lx]의 조도를 나타낼 때 조사된 광의 조도를 비교해 보면, 그림 6과 같이 렌즈 없이 태양광이 광파이버로 전송될 때의 조도는 1.23[lx] 였다. 그러나, 1·2차 측정을 통해 나타난 결과는 거리가 99[mm]인 경우에 높은 조도를 나타내고 있다.

표 2. 조도 측정값

Table 2. Measured values of illuminance

| 1 st | Distance | Illuminance |
|-----------------|----------|-------------|
| | 98[mm] | 204[lx] |
| | 99[mm] | 1100[lx] |

| 2 nd | Distance | Illuminance |
|-----------------|----------|-------------|
| | 98[mm] | 1260[lx] |
| | 99[mm] | 2540[lx] |

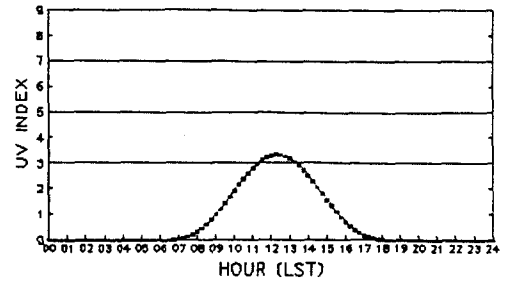


그림 9. 10월 11일의 자외선 지수
 Fig. 9. UV Index of 11day, OCT

그림 9는 측정일의 광주지역의 자외선 지수를 시간대 별로 나타낸 것이며, 측정시간은 10시40분부터 11시40분까지이다.

4. 결론

측정 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ①태양광 채광시스템의 집광광은 태양광이 갖는 자외선 분포보다 낮다.
- ②높은 조도와 자외선은 어느 정도 낮추면서, 가시광만을 얻기 위한 렌즈와 광파이버간의 거리는 99[mm]이다.

본 논문을 통해서 조명용으로 사용 하기위한 광으로 보기에 광속비의 효율은 낮으나, 집광광을 전송하기 위한 기술 개발이 뒤따른다면 효율을 극대화 할 수 있으리라 판단 된다. 또한, 마이크로의 단위로 측정 할 수 있는 장비가 있다면 최적의 거리를 찾을 수 있을 것이다.

참고 문헌

- (1) Gersil N. Kay, "Fiber Optics in Architectural Lighting Methods, Design, and Applications," Chap 6, pp.241-242, 1999.
- (2) 한국광통신, "太陽光 照明과 地下空間 (I)·(II)"
- (3) Paul A. Tipler, "Physics for scientists and Engineers," Chap 31, pp.741-744, 1993.
- (4) John Wiles & Sons, "Plastic optical fibres," Chap1, pp.1-5, 1997.
- (5) "ラフォーレエンジニアリング," 인터넷자료.