

태양광 채광시스템의 스펙트럼 분석 및 조명 적용 예

박준석*, 어익수**, 여인선*
 *전남대학교 전기공학과·HECS·POTRI, **호남대학교 전기공학과

Spectral analysis of a sunlight collector system and its application example

Jun-Seok Park*, Ik-Soo Eo**, In-Seon Yeo*

*Dept. of Electrical Engineering · HECS · POTRI, Chonnam National University, **Honam University

Abstract - In this paper, it is analysed the spectrum of optical fiber output through a sunlight collector system. Also the lighting environments under the optical fiber bundles are predicted when applied to interior lighting by using a simulation program. As the result its feasibility as an interior lighting source shows any serious problem except the system cost.

1. 서론

순수한 자연의 빛인 태양광을 이용하여 실내조명, 식물재배, 건강사우나 및 실내수영장 등에 쉽게 조명환경 조성을 할 수 있는데, 이것은 증가하는 대기오염을 줄일 수 있는 좋은 방안이다. 태양광을 실내로 끌어오는 방안 중에서도 집광 렌즈를 이용한 태양광 채광시스템이 많은 주목받고 있다.

태양광 채광시스템이란 태양광을 채광하기 위해 집광렌즈와 자동추적 장치가 있는 채광부를 갖춘 시스템을 말한다. 이러한 시스템은 피사암·홍반 발생·백내장의 원인인 자외선, 적외선을 제외한 가시광만을 조사하기 때문에 안전하게 사용될 수 있으며, 태양광과 친숙한 인간으로서 실내 조명용으로 사용할 경우 최적의 조명환경을 누릴 수 있을 뿐만 아니라, 건강미용·식물재배·어류동물사육·특수환경조명등 적용분야 또한 다양하다.

본 논문에서는 태양광의 스펙트럼과 태양광 채광시스템에서 집광·전송한 광의 스펙트럼을 비교 분석하여 가시광만을 집광·전송하는 것이 가능한지를 조사하고자 한다. 또한, 실내 조명에 적용하였을 때의 조명환경을 시뮬레이션을 통해 예측해 보고 조명광원으로서의 유용성을 검증하고자 한다.

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].

2.1 채광부

그림 2와 같이 렌즈에 의해 집광점의 위치를 구할 때에는 렌즈의 각 표면마다 일어나는 굴절률을 고려하여 집광점 거리, 렌즈 굴절률, 렌즈 각 표면의 곡률 반경과 관련시키면 된다. S를 무한대에 위치한 태양의 거리라고 하고, 상거리를 f라고 하면 아래와 같이 렌즈-제작공식(lens-maker's equation)을 이용하여 집광점 거리를 구한다[3].

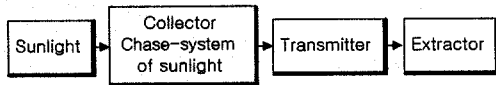


그림 1. 태양광 채광시스템의 구성
 Fig. 1. Structure of sunlight collector systems

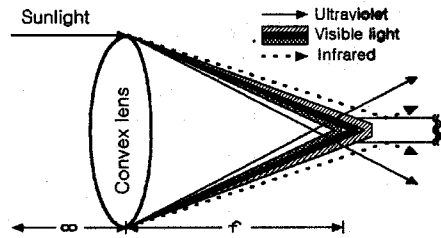


그림 2. 색수차를 이용한 태양광의 분리
 Fig.2. Spectral zone selection utilizing chromatic aberration

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

여기서, f : 초점 거리
 n : 렌즈 굴절률
 r₁, r₂ : 렌즈 각 표면의 곡률반경

다음으로 집광된 고밀도의 태양광을 그림 2와 같이 볼록렌즈를 사용해 색수차를 이용한 분광을 통해서 가시광만을 집광하는데, 렌즈를 투과하여 맺어지는 피사체의 상은 완전한 상으로 결상되기 어렵다. 이와 같이, 태양광이 파장에 따라 굴절률이 다른 점을 색수차(Chromatic aberration)라 하며, 이를 이용하면 가시광선보다 파장이 짧은 1(nm)~380(nm)까지의 화학, 살균작용을 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.

2.2 태양광 추적 장치

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 움직임을 맞추어 채광부를 추적구동 시키는 것으로 모터 2개를 이용하여 태양의 위치를 수평방향과 수직방향의 2개로 나누어 인식하는 방식과 Si Photo Cell을 이용한 광센서 방식과 마이크로 컨트롤러를 이용한 프로그래밍 내장 방식, 그리고 광센서와 프로그램 내장 방식의 병용방식이 있고 용도나 사용 조건에 따라 선택된다.

2.3 전송부

전송부는 태양광이 렌즈를 통하여 집광된 광이 광파이버 단면에 입력되어 내부 전반사를 통하여 조사부로 전송되기 전까지를 말한다. 광파이버 내부 물질에 따라서 플라스틱, 석영유리등의 광파이버가 있으며, 태양광 채광시스템에서 사용된 광파이버의 재질은 석영유리로 만든 것이며, 이는 집광된 광의 온도가 고온이기 때문이다[4].

(2) 광파이버의 구조: 광파이버는 그림 3과 같이 높은 굴절률 n_1 을 갖는 중심부분과 낮은 굴절률 n_2 을 갖는 외장부분과 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 특별한 경우를 제외하고 그 중심 직경은 0.25~3.00(mm) 정도이다.

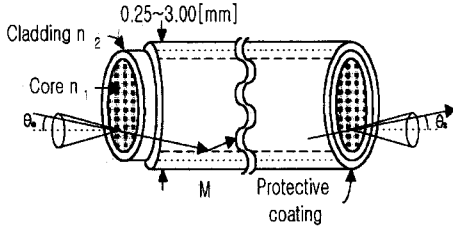


그림 3. 광파이버의 구조
Fig. 3. Structure of an optical fiber

(3) 빛의 유도: 그림 3에서 광원의 방향이 M이라고 표시된 한 점에서 만나면 굴절률 $n_2 < n_1$ 에 의해서 광원은 전반사가 되어 다시 코어 부분으로 돌아간다. 이와 같이, 반사는 광선의 초기 기울기 값이 다음 부등식을 만족해야 한다.

$$\theta < \theta_{lim} \text{ 이면,}$$

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

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

(4) 빛의 입사와 방사: 광원과 광파이버 중간에 매개체가 주로 공기라고 할 때, 입사각이 θ_0 를 갖는 광선은 거의 손실 없이 전송된다. 또한, 광파이버 매질의 굴절률이 동일하다면 입사각 θ_0 의 각도와 같은 축에 있어서 각도 θ_0 로 방사된다.

2.4 조사부

전송된 가시광을 렌즈·반사판·각종 거울 등의 조합을 통하여 다양한 산광법을 선정할 수 있다. 실험에 사용된 L사의 태양광 채광시스템은, 집광장치를 통해 태양광을 1만배 정도로 집광하여 광파이버 한 가닥에 전송하고, 이것을 각각 6가닥을 하나의 묶음으로 하여 조사하기 때문에 백열등 60[W] 이상의 밝기로 조사할 수 있다. 여름철 맑은 하늘 조건에서 지표면의 조도가 98,000[lx]의 경우 위 시스템을 이용한 광파이버 출력 특성을 표 1에 나타낸다[5].

표 1. 광파이버 출력 특성
Table 1. Light output characteristics of optical fiber specimen

Lens diameter	95[mm]
Core diameter	1.0[mm]
Lens focus length	99[mm]
Fiber length	15[m]
Flux per Core	272[lm]
Angle of output	58°

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 스펙트럼 분석

태양광 채광시스템에서 각기 다른 파장에 따라 렌즈를 통한 굴절률의 변화에 의해서 분광된 광을 전송부 단면의 거리 조정으로 가시광만을 집광 전송이 가능한지를 스펙트럼 분광기(Princeton Instruments, Model ST-121)를 사용하여 분석하였다.

구름으로 인한 측정값에 오차를 줄이고자 구름이 없는 날을 선택 조사부를 고정하고 그림 4에서와 같이 렌즈를 통하여 집광된 태양광이 조사부에서 출력된 출력광의 조도와 스펙트럼의 측정을 위해 300[mm] 떨어진 곳에 조도계를 설치하여 측정하였으며, 조사부에서 1,000[mm] 떨어진 곳에 스펙트럼 분광기 집광기 단면을 설치하였다. 렌즈는 J사의 초점거리가 99[mm]인 렌즈이고 렌즈 외경은 100[mm- ϕ]이며 광파이버는 H사의 직경이 1[mm- ϕ], 손실률은 100~1000dB/km인 광파이버 15[m]이다. 측정시 태양광은 99,000[lx]이며 측정일시는 1999년 10월12일 10시40분~11시40분이며 실험장소는 전남대학교 공대 6호관 5층, 동경 126° 54', 북위 35° 10'이다. 이와같은 조건에서 30차례의 스펙트럼 측정 결과, 99[mm] 영역대에서 높은 강도와 낮은 자외선 영역대를 나타내는 것을 측정을 통해 알 수 있었다.

그림 5는 렌즈를 거치지 않은 단지 태양광이 광파이버를 통해 전송된 스펙트럼으로 가시광의 영역 두번째 최고점의 강도와 자외선 영역의 두번째 최고점의 강도 비가 렌즈를 통한 광의 분광 스펙트럼의 비율과 비교해 볼 때 렌즈를 거치지 않은 태양광의 스펙트럼이 자외선 영역대에서 높게 나타내고 있다.

그림 6은 30여 차례 측정의 평균값으로 렌즈와 접촉 단면 광파이버간 거리가 99[mm]인 스펙트럼과 거리가 98[mm]인 스펙트럼을 비교해 볼 때 1[mm] 간격을 두고 조사단의 분광 스펙트럼을 측정한 결과이다. 그리고 거리가 100[mm]인 스펙트럼은 98[mm]인 스펙트럼과 출력된 조도값이 거의 일치하여 생략하였다. 렌즈를 통한 광만을 서로 비교해 보면 가시광선의 강도가 증가하는 만큼 자외선의 강도도 증가하였으며, 98[mm]에서의 자외선 강도와 99[mm]에서의 자외선 강도의 비 역시 같게 증가함을 알 수 있었다. 하지만, 광파이버만을 통한 태양광의 스펙트럼에 비해 태양광 채광시스템을 통한 평균 스펙트럼의 자외선의 비는 감소하였음을 알 수 있었다. 이와 같이 스펙트럼의 측정결과 가시광만을 집광·전송하기보다는 어느 정도 낮은 자외선이 분포하는 것만을 확인할 수 있었다. 그러나 가시광선 영역의 최고점 강도값을 비교해 보면 99[mm]의 최고점의 평균값이 1123.4이나 98[mm]의 최고점의 평균값은 525.9로 큰 강도 차이를 나타내고 있다.

태양광이 99,000[lx]의 조도를 나타낼 때 조사된 광의 조도를 비교해 보면 그림 5과 같이 렌즈를 이용하지 않은 상태에서 태양광이 광파이버로 전송될 때의 조도는 1.23[lx]이다. 그러나 표 2에서와 같이 30여 차례의 측정을 통해 나타난 평균 조도값을 비교해보면, 거리가 98[mm]인 경우에 중심 조도가 1.260[lx]인 반면에 99[mm]인 경우에 중심 조도가 2.540[lx]로 높은 조도를 나타내고 있다.

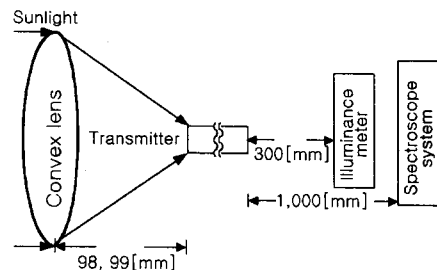


그림 4. 스펙트럼 및 조도 측정
Fig. 4. Schematic diagram of spectrum and illuminance measurements

표 2. 한기닥의 광섬유 채광시스템에서 300(mm) 떨어진 곳의 평균조도
 Table 2. Average illuminance measured at a point 300(mm) apart from the extractor of the sunlight collector system comprised of one core of optical fiber.

Distance	Illuminance
98[mm]	1,260[lx]
99[mm]	2,540[lx]

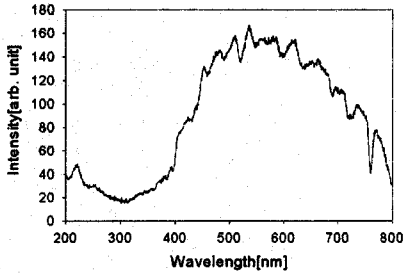


그림 5. 광파이버만을 통한 태양광의 스펙트럼
 Fig. 5. Spectrum of sunlight through an optical fiber only

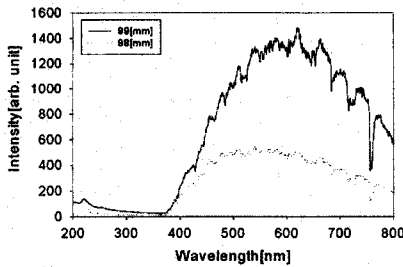


그림 6. 태양광 채광시스템을 통한 평균 스펙트럼
 Fig. 6. Spectrum of sunlight through the sunlight collector system

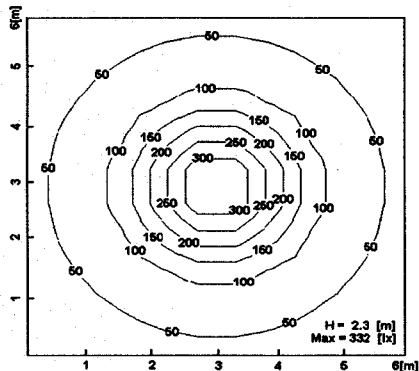


그림 7. 6기닥 한류용 광섬유 채광시스템에 대한 작업면의 조도분포 시뮬레이션
 Fig. 7. Simulation of illuminance pattern on the work-plane for a sunlight collector system comprised of a bundle of six-core optical fibers

3.2 조명 적용 예

이 시스템을 실내조명에 적용하였을 때 과연 조명용으로 적합한지 의문이다. 그래서 출력된 광에 따른 조명적용 방식에 문제가 없는지 조명 환경을 시뮬레이션을 통해 예측해 보고, 조명광원으로서의 유용성을 검증하고자 한다. 기본적인 거리에 따른 조도 값과 광속을 측정해 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 3.1절의 내용과 같이 태양광이 99,000[lx]의 경우 출력되는 광파이버 하나의 광속이 272[lm]이고, 실내에 전송된 광파이버는 6기닥을 한 묶음으로 하였으며, 조명 설계 프로그램인 Lumen Micro를 이용하여 최종 출력광을 실내에 적용하였을 때의 작업 환경을 예측해 보고자 하였다.

그림 7은 측정된 값을 Lumen Micro에서 호환하는 램프의 라이브러리 파일인 IES 파일형식으로 포맷하여 가정에서의 최소 작업공간인 6×6×2.3[m]의 공간을 설정하여 중심부에 광파이버의 출력단을 배치하였고, 실의 반사율은 천장반사율 0.8, 벽반사율 0.5, 바닥반사율 0.2로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 측정하고자하는 바닥 면의 조도분포에서 평균 조도값은 37.5[lx], 최대 조도값은 332.9[lx], 최소 조도값은 12.0[lx], 균제도(Uniformity)는 0.32이다. 이는 한 묶음의 출력광으로, 같은 공간에 네 개의 광파이버 묶음을 사용하면 평균 조도값은 146[lx]이다(6). 이와같이, 네 개의 광파이버의 묶음을 사용한다면 주간에 실내조명환경으로 적합하다 할 수 있다. 또한, 실내에 빛이 들어오지 않는 공간에서 사용한다면 태양광을 이용한 최적의 조명환경을 이룰 수 있을 것이다.

4. 결론

태양광 채광시스템을 이용한 조명적용방식은 일조량이 많은 곳에 적합하며, 어느 정도 효율향상을 이룩하게만 된다면 환경 문제를 해결할 수 있는 청정에너지로서 자연 친화적인 조명설비시스템으로 태양광 조명의 이용이 활성화 될 것이다.

본 논문에서는 측정 결과와 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 태양광 채광시스템의 출력광은 태양광이 갖는 자외선 분포보다 낮음을 알 수 있었다.
2. 출력광의 측정된 값을 근거로 IES 파일 형식으로 포맷하여 조명설계 프로그램인 Lumen Micro에서 조명 환경을 예측하였다.
3. 제품 단가를 절감 할 수 있다면 상용화가 가능하리라 본다.

향후 과제는 가시광만을 얻기 위한 최적의 거리를 찾기 위해 나노미터 단위로 측정 할 수 있는 장비가 있다면 최적의 거리를 찾을 수 있을 것이다. 이는 자외선, 가시광선의 단위가 나노미터임을 고려한다면 색수차에 따른 최적의 거리비도 나노미터 단위로 존재하리라 본다. 또한, 실내공간의 조명 설비를 할 때 균제도를 고려한 조사부의 최적 배치 간격을 찾아야 할 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's, "Plastic optical fibres," Chap.1, pp. 1-5, 1997.
- [5] "ラフォーレエンジニアリング," 인터넷자료
- [6] IESNA Handbook, 8/e. 1993.