

# 태양광 채광시스템의 스펙트럼 분석 및 조명적용방식

(Spectral Analysis of Sunlight Collector System, Application methods of the lighting )

박준석<sup>o</sup> · 이익수 · 이민선  
(Jun-Sook Park<sup>o</sup> · Ik-Soo Eo · In-Seon Yeo)

## Abstract

In this paper, we measured the spectrum analysis of sunlight and Sunlight Collector System's light, we found out the distance to get visible light, Also, It investigates the interior lighting systems by using the interior lighting simulation system which is the 'Lumen Micro'. With this simulation, It can be applied to the interior lighting methods.

## 1. 서론

순수한 자연의 빛인 태양광을 이용하여 실내조명, 식물재배, 건강사우나 및 실내수영장 등에 쉽게 조명환경 조성을 할 수 있다면 증가하는 대기오염을 줄일 수 있는 좋은 방안이다. 그래서 태양광을 실내로 끌어오는 방안을 모색하게 되었으며, 이러한 여러 방법 중에서도 집광 렌즈를 이용한 태양광 채광시스템에 의한 방법을 살펴본다[1]. 여기서 말하는 태양광 채광시스템이란 태양광을 채광하기 위해 집광렌즈와 자동추적 장치가 있는 채광부를 갖춘 시스템을 말한다.

태양광 채광시스템의 적용분야는 피부암·홍반 발생·백내장의 원인인 자외선, 적외선을 제외한 가시광만을 조사하기 때문에 안전하여 태양광과 친숙한 인간으로서의 실내 조명용으로 사용한다면 최적의 조명환경을 누릴 수 있을 뿐만 아니라, 표 1과 같이 적용분야 또한 다양하다.

본 논문에서는 태양광의 스펙트럼과 태양광 채광시스템에서 집광·전송한 광의 스펙트럼을 비교 분석하여 가시광만을 집광·전송하는지 검증하고자 하며, 렌즈와 광파이버간에 가시광만을 받아들이는 최적의 거리를 구하고, 조명적용에 있어서 측정된 출력광 값으로 Lumen Micro에서 시뮬레이션을 하여 조명환경을 예측해 보고자 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].

표 1. 태양광 채광시스템을 이용한 조명응용  
Table 1. Application of the lighting using sunlight collector system

용도	이용 범위
자연광 채광	· Intelligent Building · Studio, 극장 · 아파트, 다세대 주택, 단독주택 · 박물관 미술관 · 지하실 공간
건강 미용	· 휴게실 · 병원 등의 재활시설 · 지하철 역 구내 · 실내 일광욕실
식물재배	· 다세대 주택 맨션 등의 공동회원 · 식물원 및 식물재배업 시설 · 개인주택의 실내화원
어류 동물사육	· 해저목장, 해저공원, 양식장 · 일반 수족관 · 관상어 사육업 시설 · 동물원
특수환경	· 우주정거장 · 원자력 시설 석유 플랜트 · 연구시설

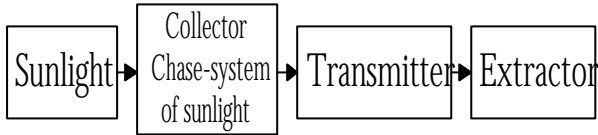


그림 1. 태양광 채광시스템의 구성  
Fig. 1. Structure of sunlight collector systems

### 2.1. 채광부

그림 2와 같이 렌즈에 의해 집광점의 위치를 구할 때에는 렌즈의 각 표면마다 일어나는 굴절을 고려하여 집광점 거리, 렌즈 굴절률, 렌즈 각 표면의 곡률 반경과 관련시키면 된다. 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

다음으로 집광된 고밀도의 태양광을 그림 3과 같이 볼록렌즈를 사용해 색수차를 이용한 분광을 통해서 가시광만을 집광하는데, 렌즈를 통과하여 뿜어지는 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[ $\mu\text{m}$ ]~380[ $\mu\text{m}$ ]까지의 화학, 살균작용을 하는 자외선과 가시광보다 파장이 긴 760[ $\mu\text{m}$ ]~1[ $\mu\text{m}$ ]까지의 온열 효과의 특성을 갖는 적외선을 제외한 380[ $\mu\text{m}$ ]~760[ $\mu\text{m}$ ]까지의 가시광만을 분리해 낼 수 있다.

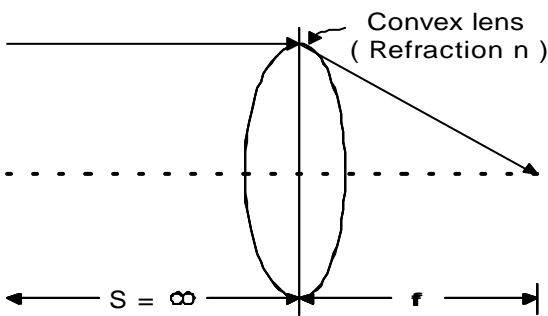


그림 2. 렌즈의 2면에서의 굴절  
Fig. 2. Reflection of len's two face

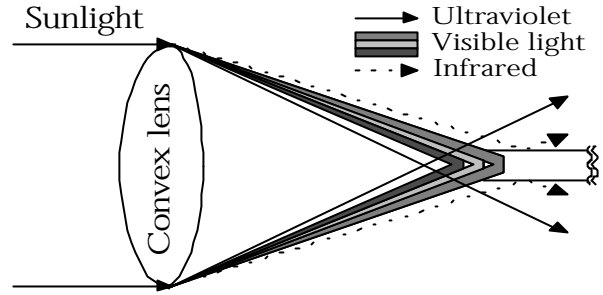


그림 3. 색수차를 이용한 태양광의 분리  
Fig. 3. Spectral selection utilizing chromatic aberration

### 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 프로그램화 내장 방식, 그리고 광센서와 프로그램 내장방식의 병용방식이 있고 용도나 사용 조건에 따라 선택된다.

### 2.3. 전송부

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

(1) 유도의 원리: 광파이버에 있어서 빛의 유도는 내부전반사의 원리를 이용한다. 빛의 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 하며, 이는 스넬의 법칙(Snell's law)을 통해 증명된다.

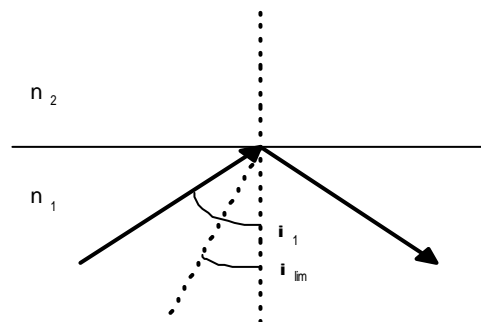


그림 4. 전반사  
Fig. 4. Total reflection

$n_2 < n_1$  이면,

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

그림 4처럼  $n_2 < n_1$  일 경우 첫번째 매질에서 입사각과 같은 반사를 한다. 만약, 두 개의 매질이 완전히 투명하고 표면이 평면이면 어떤 손실도 없이 반사가 이루어진다.

(2) 광파이버의 구조: 광파이버는 그림 5와 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.

(3) 빛의 유도: 광원의 방향이 그림 5와 같이 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.

$\theta < \theta_{lim}$  이면,

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

이 경우 광선은 기울기  $\theta$ 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  $\theta_0$ 를 갖는 광선은 거의 손실 없이 전송된다.

$\theta_0 < \theta_{max}$  이면,

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \left( \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right) \quad (4)$$

여기서,  $\theta_0$  : 수광각  
 $n_1$  : 중심부분  
 $n_2$  : 외장부분

만약, 중간 매질이 공기이면  $n_0=1$ 이고  $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

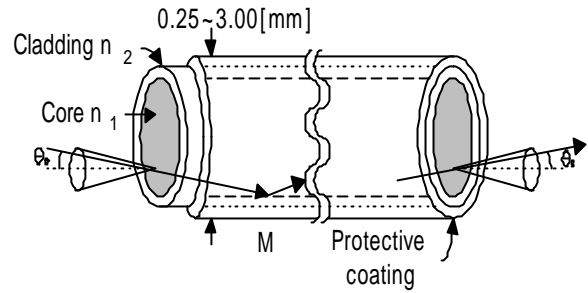


그림 5. 광파이버의 구조

Fig. 5. Structure of a fiber optic

은 광섬유의 개구수 "Numerical Aperture"(NA)로 광파이버의 고유특성을 나타낸다. 또한, 광파이버 매질의 굴절률이 동일하다면 입사각  $\theta_0$ 의 각도와 같은 축에 있어서 각도  $\theta_0$ 로 방사된다.

## 2.4. 조사부

전송된 가시광을 렌즈·반사판·각종 거울 등의 조합을 통하여 다양한 산광법을 선정할 수 있으며 조사각은  $45^\circ$ · $58^\circ$ · $65^\circ$  등이 있다. 이 시스템의 밝기는 집광장치에서 태양광을 1만배 정도의 광으로 집광하여 광파이버 한 가닥에 전송한다. 이것이 각각 6가닥을 하나의 묶음으로 조사하기 때문에 백열등 60[W] 이상의 밝기로 조사한다. 현재, L사의 태양광 채광시스템을 보면 태양광이 9만 8000[lx]의 경우 표 2와 같은 광파이버 출력광 값을 나타낸다[5].

## 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 가능한 지를 스펙트럼 분광기(Princeton Instruments Model ST-121)를 사용하여 분석하고자 하며, 가시광만을 받아들이는 최적의 거리를 구하고자 한다.

표 2. 광파이버 출력광

Table 2. Lighting fiber output

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

측정일시는 1999년 10월2일 10시40분~11시40분이며 실험장소는 전남대학교 공대 6호관 5층, 동경 126° 54', 북위 35° 10' 이다. 렌즈는 J사의 초점거리가 99[mm]인 렌즈이고 렌즈 외경은 100[mmφ]이며 광파이버는 H사의 직경이 1[mmφ], 손실률은 100~1000 dB/km인 광파이버 15[m]이다. 측정시 태양광은 9만9,000[lx]이며 구름이 없는 날을 선택 조사부를 고정하고 300[mm] 떨어진 곳에 YOKOGAWA 510<sub>ex</sub> 조도계를 사용하여 측정하였으며, 조사부에서 1,000[mm] 떨어진 곳에 스펙트럼 분광기의 검출기 단면을 설치하였다. 이 스펙트럼 분광기를 사용하여 광원의 광도와 스펙트럼에 대한 정확한 분석을 하고자 한다. 최대 강도는 15,000까지 측정 가능하다. 그러나 적외선 파장대의 측정 범위가 적은 점에 한계가 있다. 30차례의 스펙트럼 측정 결과, 99[mm] 영역대에서 높은 강도와 낮은 자외선 영역대를 나타내는 것을 측정을 통해 알 수 있으며, 그 내용은 다음과 같다.

그림 6은 렌즈를 거치지 않은 단지 태양광이 광파이버를 통해 전송된 스펙트럼으로 가시광의 영역 두번째 최고점의 광도와 자외선 영역의 두번째 최고점의 광도 비율과 렌즈를 통한 광의 분광 스펙트럼의 비율을 볼 때 렌즈를 거치지 않은 태양광의 스펙트럼이 자외선 영역대에서 높게 나타내고 있다.

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. 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 증가한다. 그러나 강도값만을 비교해 보면 99[mm]의 최고점의 평균값이 1123.4이나 98[mm]의 최고점의 평균값은 525.9로 큰 강도 차이를 나타내고 있다.

그림 8은 2차 측정시에도 1차 측정시와 유사한 분포비를 나타내었다. 그리고 렌즈와 광파이버간 거리 설정시 육안으로 확인 불가능한 마이크로 단위는 설정의 어려움이 있었다. 이 측정 장비를 정밀하게 고안한다면 마이크로 단위의 거리를 조정하면서 보다 정밀한 측정을 할 수 있을 것이다.

태양광이 9만 9,000[lx]의 조도를 나타낼 때 조사된 광의 조도를 비교해 보면 그림 6과 같이 렌즈를 이용하지 않은 상태에서 태양광이 광파이버로 전송될 때의 조도는 1.23[lx]이다. 그러나 표 3에서와 같이 1차 측정과 2차 측정을 통해 나타난 결과를 비교해보면, 거리가 98[mm]인 경우에 중심 조도가 204[lx], 1,260[lx]인 반면에 99[mm]인 경우에 중심 조도가 1,100[lx], 2,540[lx]로 높은 조도를 나타내고 있다.

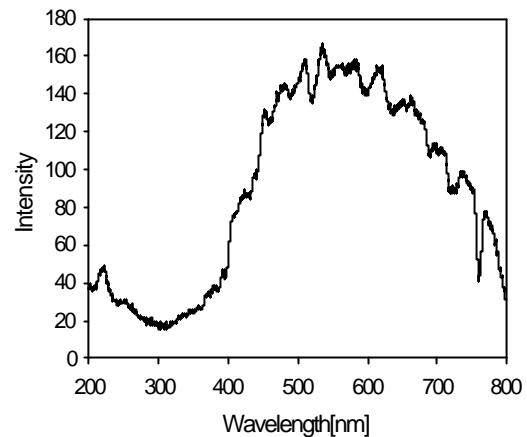


그림 6. 태양광의 스펙트럼 분석  
Fig. 6. Spectral analysis of Sunlight

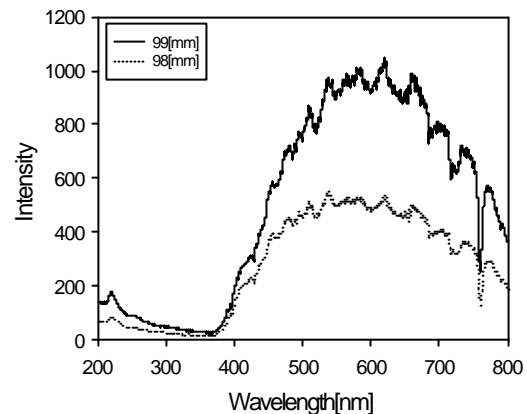


그림 7. 98, 99 [mm]에서의 스펙트럼 분석 (1차 측정)  
Fig. 7. Spectral analysis for 98, 99 [mm] (1st-measured)

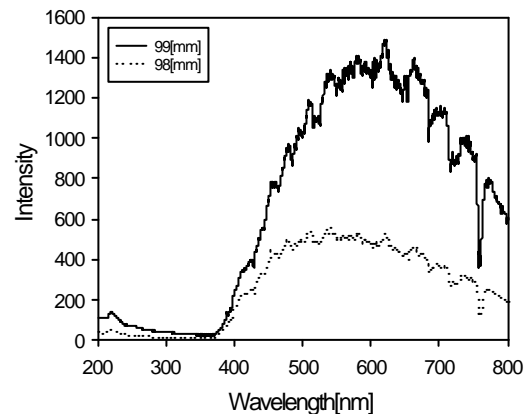


그림 8. 98, 99 [mm]에서의 스펙트럼 분석 (2차 측정)  
Fig. 8. Spectral analysis for 98, 99 [mm] (2nd-measured)

표 3. 조도 측정값 I

Table 3. Measured values I of illuminance

1 st	Distance	Illuminance
	98[mm]	204[lx]
	99[mm]	1,100[lx]

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

표 4. 조도 측정값 II

Table 4. Measured values II of illuminance

Distance [m]	Illuminance [lx]	Fidius [m]
1.0	2,364	0.581
2.0	591	1.122
3.0	263	1.683
4.0	148	2.244

### 3.2. 조명적용방식 (시뮬레이션)

태양광 채광시스템이 자연 환경을 고려한 조명 방식임에도 불구하고 쉽게 설치하기 어려운 점이 가격이고 가인 점과, 시스템을 적용하였을 때 과연 조명용으로 적합한지 의문인 점이다. 그래서 출력된 광에 따른 조명적용 방식에 문제가 없는지 작업 환경을 예측해 보고자 하며, 표 3에서와 같이 기본적인 거리에 따른 조도 값과 광속을 측정해 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 3.1.절의 내용과 같이 태양광이 9만 9,000[lx]의 경우 출력되는 광파이버 하나의 광속이 272[lm]이고, 실내에 전송된 광파이버는 6가닥을 한 묶음으로 하였으며, 조명 설계 프로그램인 Lumen Micro를 이용하여 최종 출력광을 실내에 적용하였을 때의 작업 환경을 예측해 보고자 한다. 표 4에서 측정된 조도값을 이용하여 그림 9와 그림 10과 같이 거리에 따른 조도분포와 출력단의 배광곡선을 나타낼 수 있다.

그림 11은 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 조

도값은 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].

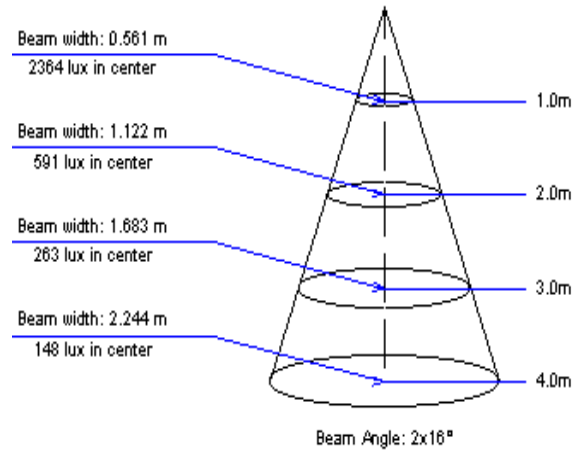


그림 9. 거리에 따른 조도값  
Fig. 9. Values of illuminance for distanced

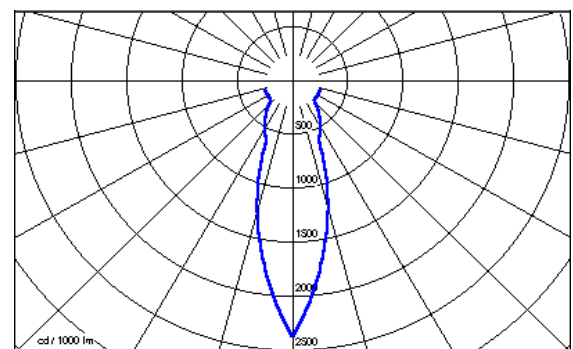


그림 10. 태양광 채광시스템의 배광곡선  
Fig. 10. Distribution curve of Sunlight Collector System

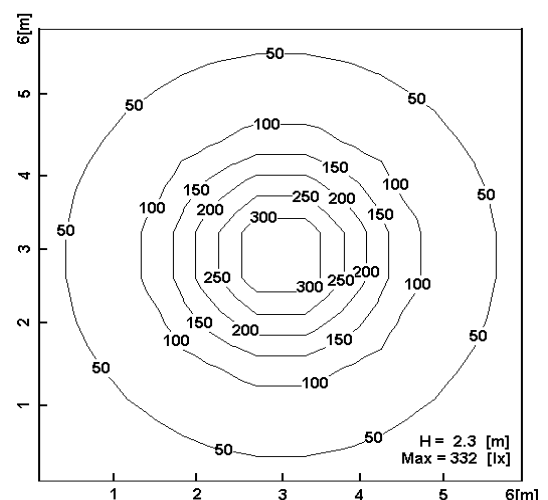


그림 11. 작업면의 조도분포  
Fig. 11. Values of illuminance on the table

## 4. 결 론

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 알수 있었다.
2. 높은 조도와 자외선은 어느 정도 낮추면서 가시광만을 얻기 위한 렌즈와 광파이버간의 최적 거리는 99 [mm]임을 확인할 수 있었다.
3. 제품 단가를 절감 할 수 있다면 상용화가 가능하리라 본다.
4. 출력광의 측정된 값을 근거로 IES 파일 형식으로 포맷하여 조명설계 프로그램인 Lumen Micro에서 조명 환경을 예측하였다.

앞으로 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.

## 참 고 문 헌

- [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, 1998.
- [4] John Wiles & Sons's, "Plastic optical fibres," Chap.1, pp. 1-5, 1997.
- [5] "ラフォーレエン지니어リング," 인터넷자료
- [6] IESNA Handbook, 8/e. 1998.