

# Photopia를 이용한 추적식 디쉬형 집광기의 배광분포 분석 및 자연채광 성능 예측

오승진\*, 한현주\*\*, 전영일\*\*\*, 천원기\*\*\*\*

\*제주대학교 에너지공학과(osj2558@jejunu.ac.kr), \*\*동국대학교 건축공학부(np090089@dongguk.edu),  
\*\*\*동국대학교 건축공학부(dtim@dongguk.edu), \*\*\*\*제주대학교 에너지공학과(wgchun@jejunu.ac.kr)

## A Computational Analysis on Candela Distribution Curves and Performance Prediction of a Fiber Optic Dish Daylighting System by Photopia

Oh, Seung-Jin\* Han, Hyun-Joo\*\* Jeon, Young-Il\*\*\* Chun, Won-gee\*\*\*\*

\*Dept. of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University(osj2558@jejunu.ac.kr),

\*\*Division of Architectural Engineering, Dongguk University(np090089@dongguk.edu),

\*\*\*Division of Architectural Engineering, Dongguk University(dtim@dongguk.edu)

\*\*\*\*Dept. of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University(osj2558@jejunu.ac.kr)

### Abstract

A set of candela distribution curves(CDCs) were generated for a fiber optic dish daylighting system by Photopia under clear sky conditions at different solar altitudes. The candela distribution curves were then exported to Radiance for photometric analysis of a windowless lecture room. Observations were made on the Radiance rendered illuminance images, which provided photo realistic scenes varying with solar altitudes. If no tracking error were assumed, the daylight collection efficiency of the system remained at a constant value of 68.4% during its operation. Higher the solar altitude angle, greater in photometric quantities were observed, which are represented by candela(cd) and total lumens(lm). In all cases considered, however, the angle of light distribution remained fixed reflecting the solar tracking feature of the system. The illuminance uniformity on the workplane lingered around 0.12, which is quite low. This is quite a contrast to its average value of 0.68 of the 2.7m<sup>2</sup> area directly below the terminal device (diffuser) of the system. The maximum illuminance of 1,340lux was obtained at a solar altitude of 80 degrees.

Keywords : 자연채광(Daylighting), 디쉬형 집광기(Dish concentrator), 포토피아(Photopia), 레이던스(Radiance), 배광 분포곡선(Candela distribution curve), 태양 고도(Solar altitude)

Submit date : 2012. 3. 10, Judgment dat : 2012. 3. 18, Publication decide date : 2012. 6. 18

Communication author : Chun, Wongee(wgchun@jejunu.ac.kr)

## 1. 서 론

전 세계적으로 화석연료의 자원고갈 및 환경오염에 대한 우려가 증가하고 있으며 최근 유가의 변동과 기후변화협약 발효 등으로 에너지 문제가 커다란 사회적 이슈로 대두되고 있다. 우리나라의 에너지 소비량을 살펴보면 가정 및 상업 건물에서의 에너지 소비량은 전체 에너지 소비 중 21%를 차지하며 이중 전기에너지가 차지하는 비중은 30%나 된다[1]. 또한, ECO2-OD를 통한 분석결과 일반 오피스건물에서 조명에너지가 차지하는 비중은 23.3%로 큰 비중을 차지하고 있다. 더욱이 가정부분의 용도별 에너지소비 추이를 보면 1990년부터 2008년까지의 용도별 소비량 중 가장 높은 증가율을 보이는 것은 조명으로 연평균 5.8%씩 증가하였다[2, 3]. 이에 따라 각국은 지구 온난화 방지 및 에너지 사용 저감을 위한 각종 제도가 추진되고 건축 분야에서는 자연광을 조명원으로 이용하려는 노력(자연채광)이 계속되고 있다. 자연채광은 단순히 조명 에너지 소비량을 감소시키는 목적뿐만 아니라 질병치료 및 생활공간의 시환경 개선 차원에서 그 중요성이 부각되고 있다[4].

자연채광 시스템은 크게 자연형 채광(고정 방식)과 설비형 채광(추적 방식)으로 분류된다. 특히, 설비형 채광 방식은 다양한 형태의 반사거울, 프리즘, 렌즈와 광섬유 등을 사용하여 태양광 채광 효율의 극대화를 꾀하고 있으나, 이를 실제 건축물에 적용하여 실증 실험을 수행하기 위해서는 막대한 비용과 시간이 소모된다. 이런 문제점을 해결하기 위하여는 실증실험에 앞서 다양한 조명 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 성능을 예측하는 것도 상당히 바람직 할 것이다.

Photopia는 Non-imaging Optical 시스템의 빛의 분포를 예측하는 용도로 사용되는 소프트웨어로 광선추적(ray-tracing)기법을 이용하여 3차원적 배광분포, 작업면 조도분포

등을 예측할 수 있기 때문에 효율적으로 조명기구를 설계할 수 있다[5].

Radiance는 미국 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)에서 개발한 조명시뮬레이션 소프트웨어로써 빛의 거동을 물리적으로 시뮬레이션을 수행한 결과로부터 조도 및 휘도 분포를 계산하고 가시화하여 빛 환경의 정량적, 정성적 평가가 모두 가능한 장점을 가지고 있다. 광선추적기법을 기본으로 광선이 자연적으로 진행되는 방향의 반대 방향으로 추적하여 실제 광선에서의 광원 활동을 예측한다[6].

태양추적식 소형 반사경에 대한 Photopia를 이용한 시뮬레이션은 직경 25cm의 주 반사경, 2차반사경(평면거울), Homogenizer와 유리 커버로 구성된 자연채광 시스템에 대한 연구가 수행된 바 있으며, 주 반사경에서 반사되는 조도와 Homogenizer의 입구 및 출구 부분에서의 조도 분포를 시각적으로 제시하였다[7]. 한편, 일반 조명기구의 배광분포 데이터를 Photopia를 사용하여 시뮬레이션 하고 이를 측정값과 비교한 연구도 보고된 바 있다 [8]. 동 연구는 세 가지 타입 조명기구의 배광분포 측정값과 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, 매입형 다운라이트 조명기구의 경우 시뮬레이션 결과값과 측정값이 거의 일치함을 보여주었다.

Linux 기반의 Radiance를 사용하여 톨러 웨이드와 베니션 블라인드의 주광이용 특성을 분석한 연구도 수행 된 바 있는데, 선행연구에 사용되지 않은 시뮬레이션 명령어를 소개하였다[9]. Radiance의 실제 빛 환경 설계 및 평가 도구로서의 활용도에 대한 연구는 담천공 하에서의 자연채광에 의한 조도 값 측정치와 시뮬레이션 결과 값에 대한 비교를 수행하였으며, 아울러 Radiance의 렌더링 이미지에 대한 포토 그래픽 현실성을 평가하였다[6].

조명 소프트웨어 및 자연 채광 시뮬레이션을 이용한 기존 연구에서는 대부분 자연형 시스템의 성능예측에 관한 것이며 디쉬형 집광기와 같은 설비형 시스템의 성능 예측에 관한 연구

는 미미하다고 할 수 있다. 디쉬형 집광기와 같이 태양을 추적하는 시스템들은 실질적인 현장 평가에 앞서 성능 예측을 하기 위한 시뮬레이션이 어렵다. 고정 방식과는 달리 추적 방식은 컴퓨터 시뮬레이션 과정 중 태양의 위치에 따라 시스템이 항상 태양을 향하도록 하여야 하기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 추적식 디쉬형 집광기를 이용한 자연채광 시스템의 성능을 예측하고자 Photopia를 사용하여 태양 고도별 배광분포곡선을 구하였으며 Radiance에서 배광분포 데이터를 적용하여 실내 빛 환경에 대한 예측과 더불어 성능 평가를 실시하였다.

## 2. 이론적 모델링

### 2.1 디쉬형 집광기의 이론적 설계

디쉬형 집광기는 포물면을 갖는 주 반사경, 2차 반사경, Homogenizer, 광섬유 케이블, 광학렌즈(Diffuser)로 구성되어 있다. 포물면은 포물선 축을 중심으로 360°회전시켜 만들어진다. 포물면은 포물선 축에 수직한 태양 빛이 초점을 관통하여 표면으로부터 반사하게 된다. 디쉬형 집광기는 포물면 일부 부분이 잘려나간 형상이고 직각 좌표계에서 식 (1)과 같이 표현된다.

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (1)$$

여기서, x 와 y는 개구부 면적에서의 좌표계이고, z는 포물면 대칭축에 평행한 정점으로부터 거리이고 f는 초점거리를 나타낸다. 초점길이 대 직경 비(f/d)는 포물면의 형상과 상대적 위치를 정의한다. 포물면의 형상은 림각(rim angle,  $\Psi_{rim}$ )에 의해 결정 된다. 림각은 포물선 축에서부터 포물면이 잘려나간 가장자리까지 초점에서 측정된 각을 말하며, f/d와 림각 사이의 관계는 식(2)와 같다.

$$f/d = \frac{1}{4 \tan(\Psi_{rim}/2)} \quad (2)$$

예를 들면, 45°의 림각을 갖는 포물면은 f/d가 0.6을 갖는다. 림각이 감소함에 따라 f/d는 증가한다. 즉, 림각이 작을수록 포물면은 평평해지며 초점거리는 길어진다.

본 연구에서는 초점길이가 0.195m이고 직경이 0.3m인 주 집광기를 사용하였다. 림각은 42°이며 f/d는 0.65 이다. 한편, 2차 반사경의 초점길이는 0.0195m이고 직경은 0.03m이며 림각은 42° 이다. 이

디쉬형 집광기는 집광비를 증가시키는 역할을 수행함으로 초점지역에 고열을 발생시키는 문제점이 발생하게 된다. 본 연구에서 사용하는 집광기는 그 직경이 30cm이하로 다른 상업용 혹은 연구용 집광기(1m 이상)보다 열 발생이 적으며 95%~98%의 높은 반사율 및 적외선 필터적용 등의 방법을 통하여 고열 문제를 해결할 수 있다.

### 2.2 Homogenizer, 광섬유, Diffuser

Homogenizer와 광섬유 케이블은 자연 채광시스템에서 전송부의 역할을 담당한다. Homogenizer는 2차반사경으로부터 재 반사된 빛을 광섬유 케이블로 전송시킨다. 또한, 주 반사경의 태양 추적 오차를 줄여주는 역할을 수행한다. Homogenizer의 길이는 175mm이고, 입구 내경이 20mm 그리고 출구 내경은 12mm로 리듀서(reducer) 형태로 설계되어 있다. 광섬유 케이블은 Homogenizer로부터 전송된 빛을 주변 장애물에 영향을 받지 않고 효율적으로 광학렌즈로 전송시킨다. 광섬유 재질은 다수의 유리섬유 다발로 이루어져 있고 외부 피복 두께는 17mm이며 길이는 3m이다. 3m 길이의 광섬유 투과율은 87%이다 [11]. 광학렌즈는 자연채광 시스템에서 산광부 역할을 담당한다. 즉, 광섬유 케이블로부터 전송된 빛을 원하는 장소에 효과적으로 산란시키기 위하여 사용된다. 광섬유에서 나오는 빛의

분산 각도를 증가시키기 위해서는 일반적으로 오목, 볼록 혹은 프레넬 렌즈를 사용한다. 본 연구에서는 프레넬 렌즈를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 1은 구성요소들의 기하학적 구조를 갖는 디쉬형 집광기의 3D모델링을 보여주고 있다.



Fig. 1 3D modeling of a fiber optics daylighting system.

### 2.3 이론적 효율 분석

디쉬형 집광기의 자연광 수집 효율( $\eta_c$ )은 식(3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta_c = \frac{\Phi_o}{\Phi_i} \quad (3)$$

여기서,  $\Phi_o$  은 광학렌즈로부터 나오는 총 광속이고  $\Phi_i$ 는 디쉬형 집광기의 주 반사경으로 입사하는 총 광속을 의미한다. 디쉬형 집광기처럼 반사경 및 렌즈를 사용하는 설비형 시스템들은 주로 시스템에 수직으로 입사하는 빛만 사용한다. 즉, 자연채광의 광원은 직사일광(Direct sunlight), 확산천공광(Diffuse skylight), 반사광(Reflected light)로 구분 되는데 이들 중 직사일광만 시스템이 수집하게 된다. 따라서 태양으로부터의 직사일광은 식(4)로부터 얻어진다[12].

$$E_{dn} = E_{sc} \left( 1 + 0.034 \cos \frac{2\pi(J-2)}{365} \right) e^{-cm} \quad (4)$$

여기서,  $E_{sc}$ 는 일광상수(solar illumination constant)로 태양과 지구의 거리를 궤도 반지름의 평균치로 할 경우에 태양에 의해 생기는 대기 밖의 조도를 의미한다. 일반적으로 일광상수는 133.1klx를 사용한다. J는 율리우스 적일(Julian date)로 일 년 중 몇 번째 날에 해당되는지를 의미한다. c는 대기에 의한 소멸 계수(Atmospheric extinction coefficient)로 청천공 상태에서는 0.21, 부분 담천공에서는 0.80, 그리고 담천공 상태에서는 0.80이상을 사용한다. m은 대기 노정 혹은 광학적 공기량(Air mass)으로 대기층에 대하여 비스듬히 입사하는 태양광이 지표에 도달할 때까지 통과하는 공기의 질량과 수직으로 입사한 경우에 통과하는 공기의 질량비를 의미하며 식(5)으로부터 주어진다.

$$m = \frac{1}{\sin a_t} \quad (5)$$

여기서,  $a_t$ 는 태양 고도각(단위:radian)을 나타낸다.

따라서 태양 고도에 따른 디쉬형 집광기의 주 반사경으로 입사하는 총 광속( $\Phi_I$ )은 식(4)에 주 반사경의 면적( $A_c$ )을 곱함으로써 구해진다.

$$\Phi_I = E_{dn} \times A_c \quad (6)$$

조명도 분포의 균일한 정도를 균제도라고 하며, 평균 조도치에 대한 최소 조도치( $E_{min}/E_{ave}$ ) 혹은 최대 조도에 대한 최소 조도의 비( $E_{min}/E_{max}$ )로 정의된다. 본 연구에서는 전자( $E_{min}/E_{ave}$ )를 사용하였다. 한편, 광원의 광도(cd)와 광속(lm) 사이에는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$Candella\ output\ (cd) = Lumen \times Sr \quad (7)$$

여기서, Sr은 고체각(Solid angle)으로써 3차원에서 일정한 반지름을 가지고 있는 구(sphere)

의 표면 위의 임의의 면적이 원점과 형성하는 각을 의미하며, 그 면적을 반지름의 제곱으로 나누는 양으로 정의된다. 즉, 고체각은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Sr = 2\pi \times (1 - \cos \frac{\theta}{2}) \quad (8)$$

여기서,  $\theta$ 는 광원의 입사 각도를 의미한다.

### 3. 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 청천공 상태에서 디쉬형 집광기의 자연채광 성능을 분석하고자 Photopia와 Radiance 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 장소는 제주대학교 에너지공학과 강의실 (경도: 125.56E 위도: 33.45N, 북향)을 대상으로 수행하였다. 본 연구에서는 창을 통하여 들어오는 자연광을 배제시키고 디쉬형 집광기의 단일 성능을 분석하고자 무창공간을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2는 강의실의 크기, 디쉬형 집광기의 광학렌즈(Diffuser) 및 센서 위치를 보여주고 있다.

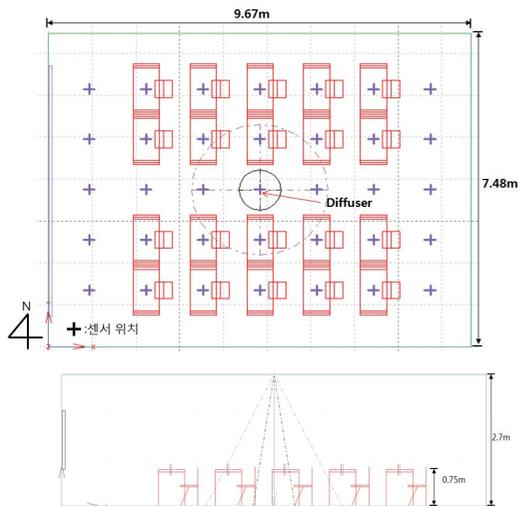


Fig. 2 Dimensions of a classroom and the positions of a diffuser and sensors.

강의실의 너비는 9.67m × 7.48m 이며 높이는 2.7m 이다. 한 쪽 벽면에는 화이트보드가 있으며 총 10개의 책상이 놓여있다. 채광시스템의 산광기 (광학렌즈; Diffuser)는 천정의 중심에 위치하고 있는 것으로 가정하였다. 센서는 총 35개이며 가로 1.3m, 세로 1.2m의 간격으로 설치되어 있고, 산광기의 수직면 아래와 광원의 Cut-off angle (최대 광도의 10%의 세기가 미치는 각도) 범위 안에 4개의 센서가 위치하도록 하였다.

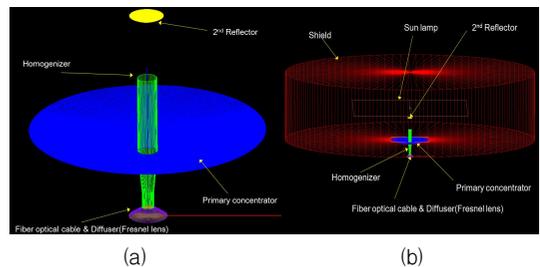


Fig. 3 Simulation modeling in Photopia (a) a fiber optics daylighting system, (b) Sun lamp and shield.

Fig. 3(a)은 포토피아에서의 디쉬형 집광기 모델의 메쉬 (Mesh) 구조를 보여주고 있으며 (b)는 Sun lamp와 차폐(Shield)의 개구부에 디쉬형 집광기가 위치된 모습을 보여주고 있다. 메쉬의 수가 많을수록 시뮬레이션의 정확도는 향상된다. 특히, 본 연구에서 시뮬레이션하는 모델은 비구면 (포물면) 집광기로 그 정확도가 중요하여 메쉬 수를 122,400개로 설정하였다. 포토피아는 자연채광 시뮬레이션을 위하여 태양과 천공의 "lamp" 모델을 제공한다. 이 램프는 천공상태 및 태양의 고도, 그리고 천공들의 개구부 크기에 따라 총 36개가 있다. 즉, 첫 번째 구분 요소는 천공 상태가 청천공인지 담천공인지에 따라 분류된다. 두 번째 구분 요소는 태양의 고도에 따라 구분되어 지는데, 수평면에서의 태양의 위치까지의 각도로 10°에서 90°까지 10° 간격으로 분류된다. 마지막 구분요소는 천공들의 개구부의 크기이다. 천공들은 반구 형태로 바닥면

중심에 뚫린 곳 (Photopia에서는 반경 1ft, 2ft, 4ft의 크기를 제공)을 제외하고는 모두 차폐(shield)되어 있다. 이는 자연채광 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행함에 있어 태양 및 천공 램프에서 발생된 빛이 개구부로만 빠져나고 주변으로는 새어나가지 않기 위함이다. 즉, 자연채광 시스템의 수광부가 개구부 안에 위치하게 되며 램프에서 발생된 광선 중 수광부로 입사된 성분만 시뮬레이션에서 고려하게 된다. 앞서 언급하였듯이, 디쉬형 집광기는 직사일광만 수집하므로 천공돔은 고려하지 않았다. 즉, Sun lamp에서 발생하는 광선만이 시뮬레이션 과정에 포함된다. Sun lamp에서 생성된 광선이 주 집광기 안으로만 유입되지 않고 주변으로 반사되기 때문에 시뮬레이션 결과에 영향을 미친다. 주 집광기 안으로만 유입되는 빛만을 시뮬레이션과정에 포함시키기 위하여는 차폐(Shield)를 모델링을 수행하여야 하는데, 차폐는 광선을 100% 흡수하는 물질로 이루어져 있다고 가정한다. 즉, 주 집광기 밖의 광선은 단 1%도 반사시키지 않고 모두 흡수한다. 주 집광기, 2차 반사경, 그리고 Homogenizer의 내부 재질은 반사율이 0.98인 은으로 가정하였다. 빛을 확산시키기 위한 광학렌즈로 확산각도가 큰 프레넬 렌즈를 사용하였다. Photopia에서의 시뮬레이션은 주 반사경, 2차반사경, Homogenizer와 광학렌즈(Diffuser)에 대하여 수행되었다. 하지만, 실제 시스템에서는 Homogenizer와 광학렌즈 사이에 광섬유 케이블이 존재하며 이로 인한 광손실을 고려해야만 한다. 본 연구에서는 3m길이의 유리 광섬유(SOG-70S, Sumita Optical Glass, Inc)를 사용하였을 때를 가정하여, 투과율 87%를 적용하였다. 즉, 87%의 투과율을 갖는 원형 유리 패널이 Homogenizer와 광학렌즈 사이에 존재하는 것으로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

포토피아에서 시뮬레이션을 실행하기에 앞서 가장 마지막으로 설정하는 것은 총 램프(Sun and sky lamp)로부터 발생하는 총 광선 수를 지정해주는 것이다. 일반적으로 많은

광선수가 발생할수록 정확도는 증가한다. 일반 전기 조명의 경우 정확한 배광분포 데이터를 얻기 위해서는 2,500,000에서 5,000,000의 광선수가 필요하다. 하지만, 자연채광의 경우 20,000,000에서 50,000,000 범위가 추천 되며 본 연구에서는 보다 정확한 결과를 위하여 50,000,000로 설정 하였다.

본 연구에서는 태양고도에 따른 디쉬형 집광기의 배광분포 곡선을 생성하기 위하여 10°에서 80°까지 10°간격으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 장소로 설정된 강의실은 태양 고도의 범위가 하지에 최고 80°에 이른다. 따라서 10°~80°의 범위에서의 디쉬형 집광기의 배광분포 특성을 이용하면 일 년 동안의 디쉬형 집광기의 자연채광 성능을 살펴 볼 수 있다. Photopia를 통하여 생성된 배광 데이터는 광도 및 광속 등의 정보를 갖고 있다. Radiance에서는 이 배광 데이터를 사용하여 태양 고도에 따른 실내 휘도 및 조도 분포를 계산하여 렌더링을 수행한다. 또한, Ecotect와 연계하여 특정 지점에서의 휘도 및 조도 값을 얻을 수도 있다. 본 연구에서는 디쉬형 집광기만의 성능을 분석하고자 창문이 없는 공간에 디쉬형 집광기를 설치하였을 경우 배광분포 특성, 자연광 수집 성능, 실내 조도분포, 균제도를 분석하였다.

#### 4. 결 과

Table. 1은 식(4)와 (6)을 사용하여 계산되어진 태양고도각에 따른 디쉬형 집광기의 입력 광속 및 출력 광속을 보여주고 있다. 출력 광속은 Photopia의 시뮬레이션 결과 값을 사용하였으며, 수집효율은 식(3)을 사용하여 계산하였다. Fig. 4는 외부 수평면 조도 대비 자연광 수집효율을 보여주고 있다. Table. 1과 Fig. 4로부터 디쉬형 집광기의 자연광 수집효율은 태양 고도 및 외부 수평면 조도에 관계없이 68.4%로 일정한 것을 알 수 있다. 이는 수집효율 계산 시 직사일광만을 고려하였기 때문이다. 즉, 확산 천공광 및 반사광은

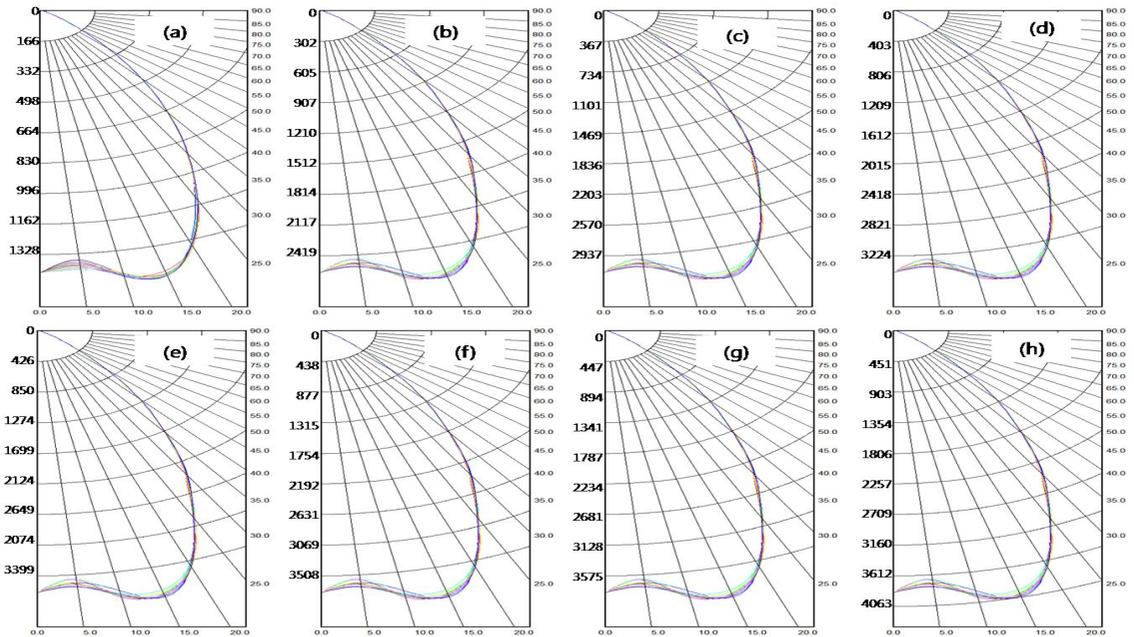


Fig. 5 Simulation results of Photopia; Candela distribution curves at various solar altitude angles.

집광기로 입사하여도 실내로 유입되지 않고 1차반사경에서 외부로 재반사되기 때문이다. 또한 68.4%의 높은 효율은 디쉬형 집광기가 태양을 정확히 추적해야 하며 본 시뮬레이션은 추적 오차를 고려하지 않았다.

Table. 1 Collection efficiency at various solar altitude angles.

| $\alpha_i [^\circ]$ | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\Phi_i [lm]$       | 2714 | 4923 | 5976 | 6561 | 6915 | 7137 | 7274 | 7349 |
| $\Phi_o [lm]$       | 1880 | 3367 | 4087 | 4487 | 4729 | 4881 | 4975 | 5026 |
| $\eta_c [\%]$       | 68.4 | 68.4 | 68.4 | 68.4 | 68.4 | 68.4 | 68.4 | 68.4 |

Fig. 5는 청천공하에서의 태양고도에 따른 디쉬형 집광기의 배광 분포 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 렌즈를 통하여 나오는 빛의 분포는 태양고도에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 이는 집광된 빛이 Homogenizer 및 광섬유 케이블을 통과하면서 균일해지고 렌즈에 의해 확산각도가 변함을 알 수 있다.

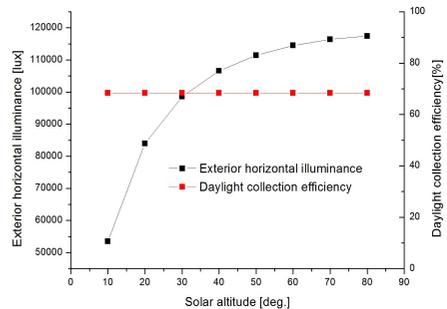


Fig. 4 Daylight collection efficiency with exterior horizontal illuminance.

즉, 빛의 광도만 달라질 뿐 확산 각도는 렌즈의 성질에 의존하게 된다. 렌즈를 사용하지 않고 광섬유케이블만 사용하면 좁은 면적을 조사하게 된다. 보다 넓은 조사 면적 및 균제도를 위해서는 광섬유 케이블의 출구를 천정을 향하여 비추고 그 위치에 반사갓을 설치하여 이를 2차 광원으로 이용하여 확산시키는 방법 혹은 렌즈 앞에 불투명 커버를 사용하는 방법이 있다 (전반조명). 시뮬레이션 결과에

의하면 태양고도가 10°부터 80°까지 증가 할 때 광도(cd)는 각각 1459, 2605, 3163, 3472, 3659, 3777, 3849, 3889로 계산되었다. 광원의 최대 크기보다 10배 이상 떨어져 있는 거리에서는 그 광원을 점광원으로 볼 수 있으며, 실질적으로는 5배 이상의 거리에서도 점광원으로 취급할 수 있다. 따라서 식(7)과 (8)를 적용하면 디쉬형 집광기의 입체각은 0.77이며 확산 각도는 57.5°이다. 또한 약 35° (hot-spot angle)에서는 최대 광도의 50%가 도달하고 51° (cut-off angle) 각도에서는 최대 광도의 10%가 도달한다. 이들을 고려하면, 최대 광도의 10%가 도달하는 면적은  $A=2\pi (H\times\tan\Theta)$ 이므로 2.7m<sup>2</sup>로 구해진다. 여기서, H는 작업면에서 광원까지의 높이이고,  $\Theta$ 는 입사각도를 나타낸다.

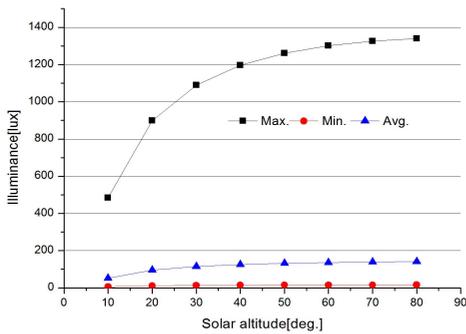


Fig. 6 Illuminance level on the work plane at various solar altitude angles.

Fig. 6은 Fig. 2에서 표시된 센서 값 중 최대, 최소 및 평균치를 보여주고 있으며, Fig. 7은 작업면에 도달하는 면적(최대 광도의 10%까지)에 대한 최대, 최소 그리고 평균치를 보여주고 있다. 또한, Fig. 8은 태양고도에 따른 균제도를 나타낸다.

최대 조도 값은 광원에 수직인 지점에서 측정되었으며, 태양고도가 10°일 때 484lux이었으며 80°일 때는 1340lux로 계산되었다. 이는 Fig. 4의 외부수평면 조도와 마찬가지로 30°까지는 급격하게 증가하고, 그 이후로는 완만하게 증가함을 알 수 있다. 외부수평면 조도와

직사 일광이 Air mass의 영향을 받는 것을 고려하면 이는 충분히 예측할 수 있다. 즉, Air mass는 태양의 고도가 90° 일 때까지 감소하여 1의 값을 갖게 되는데, 태양의 고도가 30°까지는 그 값이 급격하게 변화하기 때문이다.

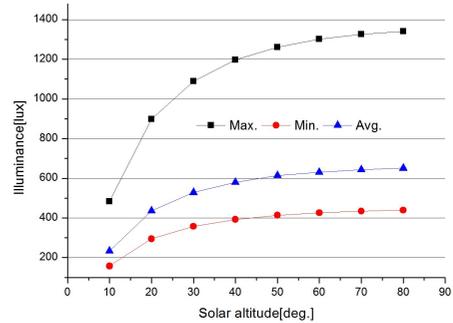


Fig. 7 Illuminance level on area where 10% of the maximum luminous intensity reaches.

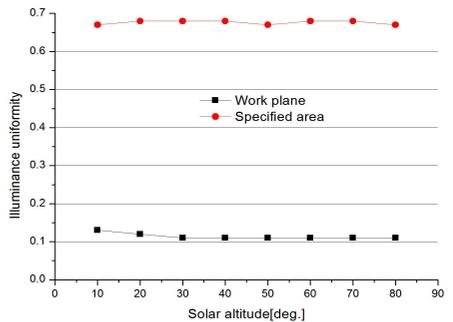


Fig. 8 illuminance uniformity at various solar altitude angles.

태양고도에 따른 작업면 전 범위의 평균조도는 200lux 이하이며, 태양고도가 80°일 때는 140lux로 나타났다. 이는 Fig. 8의 균제도를 살펴보면 알 수 있듯이 최대 조도값을 감소시키고 평균 조도값을 증가시켜야 함을 의미는데, 전술했듯이 전반조명을 사용함으로써 해결할 수 있다. 한편, Fig. 7은 최대 광도의 10%까지 도달하는 면적에서의 조도레벨을 보여주고 있다. Fig. 6을 고려하여 같이 살펴보면, 최소 조도값이 평균 27배 높이에 따라 평균 조도 값도 증가함을 알 수 있다. 이 그림을 살펴보면 하나의 광원으로 앞

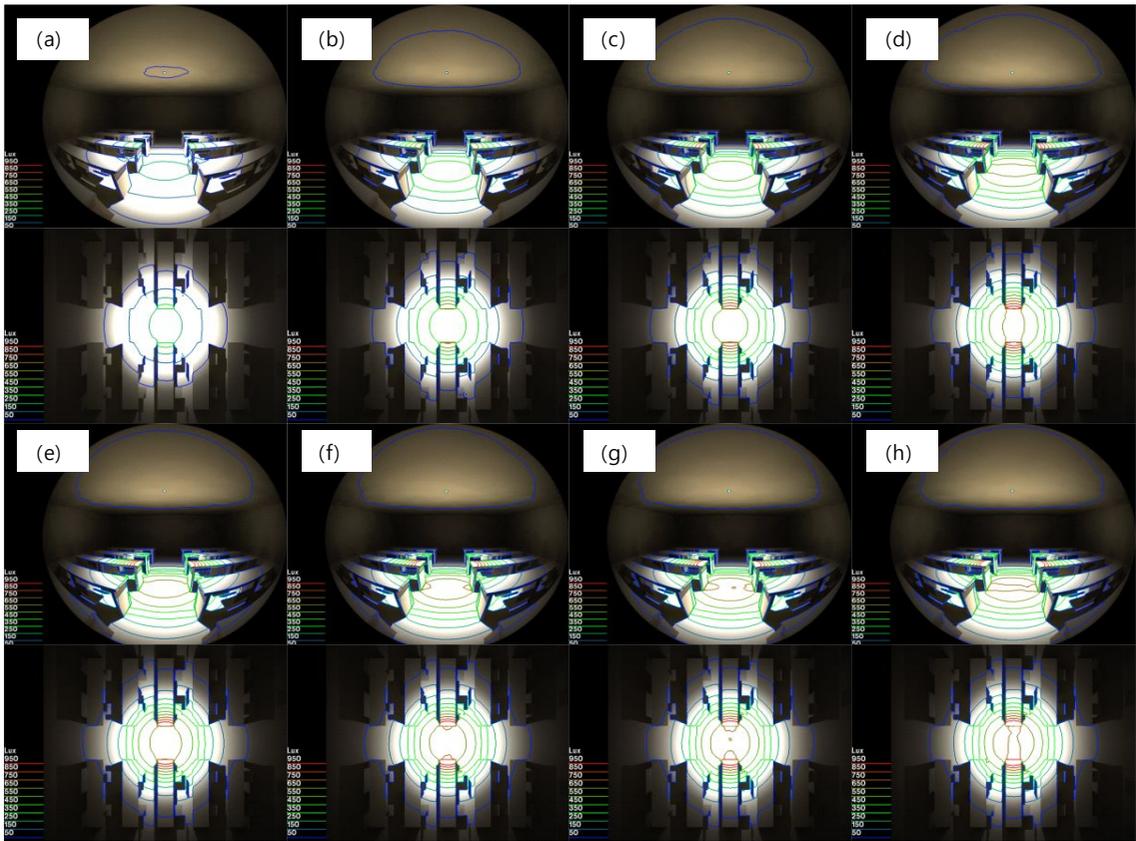


Fig. 9 Rendering images of RADIANCE; solar altitude : (a)10°, (b)20°, (c)30°, (d)40°, (e)50°, (f)60°, (g)70° (h)80°.

서 언급한 산광기 아래의 2.7m<sup>2</sup>의 면적은 충분히 밝힐 수 있으며, 이때 균제도 또한 0.68로 상당히 높게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이는 강의실이 (경도:125.56E 위도:33.45N) 위치한 사이트에서는 낮 시간이 가장 짧고 태양의 남중고도가 가장 낮은 동지(12월21일)에도 하나의 광원으로 오전 8시40분부터 오후 4시30분까지는 평균 조도가 234lux에서 528lux까지 조사시킬 수 있음을 의미한다.

Fig. 9는 태양 고도에 따른 Radiance 렌더링 결과를 보여주고 있다. 각각의 고도에 따라 어안렌즈로 촬영(상)과 정사도법에 의한 평면뷰(하)의 등조도 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 태양고도가 증가함에 따라 조사면적은 크게 변화하지 않으나 조도

값이 증가함을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 추적식 디쉬형 집광기의 실증 실험에 앞서 채광 성능을 예측하고자 Photopia를 사용하여 청천공 상태에서의 태양 고도별 배광분포 곡선을 생성 하였으며 Radiance 소프트웨어에서 이를 적용하여 실내 빛 환경 성능을 평가 하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 디쉬형 집광기의 자연광 수집효율은 68.4%로 매우 우수함을 알 수 있었다. 하지만, 이는 추적오차를 고려하지 않은 것이므로 실제로는 이보다 낮을 것으로 사료된다.
- (2) 디쉬형 집광기의 배광분포 곡선의 형태는

태양의 고도와 관계없이 일정함을 알 수 있었다. 고도에 따라 광도와 총 광속만 증가하고 배광분포는 일정한 패턴을 유지하였다. 즉, Homogenizer와 광섬유 케이블을 통과하면서 빛은 균일하게 흘러감을 의미하며, 배광은 광학 렌즈에 따라 그 패턴이 달라질 수 있음을 나타낸다.

- (3) 72m<sup>2</sup>의 무창 공간에 한 개의 디쉬형 집광기를 설치하였을 경우에는 최대조도와 최소조도의 차가 커서 균제도가 낮게 나타났다. 태양 고도가 80°일 때 광원에서 바로 아래에 위치한 작업면에서의 최대 조도는 1,340lux, 평균 조도는 200lux 이하로 각각 계산되었다. 한편, 하나의 산광기를 적용한 조명 가능 범위인 2.7m<sup>2</sup>의 면적에서는 균제도는 0.68까지 상승하였다.
- (4) 본 시뮬레이션의 배광 분포 데이터는 디쉬형 자연채광 시스템에 대한 연중 성능 평가를 위한 기초 자료를 제공하고 있다.
- (5) 본 연구의 결과는 디쉬형 자연채광 시스템을 (다수) 설치한 무창 공간이 아닌 남측이나 북측 창 등이 있는 공간에 대한 조명학적 분석에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

### Acknowledgements

본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업 지원으로 수행된 연구임(No.2011-0029820).

### References

1. Korea Energy Economics Institute, Yearbook of Energy Statistics, ISSN 1226-606X,(2011)
2. Hong, G.P., the introduction of domestic buildings total amount of energy consumption, (2011)
3. Lee, S.G., Study on the Residential Energy Consumption by Use and Retrospective supplements, Research Project Report of the Korea Energy Economics Institute10,5, (2010)
4. Lee, H.S, Park, L.D., The effect of Daylighting on Treatment and Life space, Journal of the Korean Solar Energy Society 5,3,3-8,(2006)
5. Kim, H., Kim, K.H., Kim, J.W., Characteristic of Photopia and the examples used, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 16,47-57, (2002)
6. Yang, H.I., Song, K.D., Validating RADIANCE Program as Design and Evaluation Tools for the Luminous Environment, Journal of Architectural Institute of Korea 20,1,485-488, (2000)
7. Han, H., Kim, J.T., Design, Fabrication and Performance Analysis of Fibre Optic Concentrators for Daylighting, Journal of the Korean Solar Energy Society 27,4,129-136, (2007)
8. Kim, Y.S., Park, B.C., Choi, A.S., A Study on a Comparison of the Computer Simulated Data and Measured Data of Photometric Data, KIIEE Annual Spric Conference, 2006.11
9. Park, B.C., Kim, Y.S., Jeong K.Y., Choi, A.S., Lee, J.H., Analyzing Daylight Distribution and Evaluating Discomfort Glare of Roller Shades and Venetian Blind Using the RADIANCE Software, Journal of Architectural Institute of Korea 27,1,993-996,(2007)
10. William B. Stine and michael Geyer, Power from the sun, Chapter.8,pp.3~5.
11. The Light Co., <http://www.thelight.co.kr/>
12. David L. DiLaura et al, IES handbook 10th edition, IESNA, 2011. pp.281 ~ 283