

# 光學裝置를 갖는 太陽光傳達시스템의 性能解析에 관한 연구

## Analyzing the Performances of Beam Sunlight Systems with Optic Devices

송 규 동\*      원 종 주\*\*  
Song, Kyoo-Dong      Won, Jong-Joo

### Abstract

The purpose of this study is to develop a numerical model to accurately model Beam Sunlight Systems with Optic devices for collecting and distributing direct beam sunlight. This paper mainly discusses the algorithms of the numerical model and its validation process through measurements with an actual Beam Sunlight System. The results showed that the numerical model can be used for designing and estimating the performances of Beam Sunlight Systems.

키워드 : 태양광전달 시스템, 자연채광, 광학장치, 광선추적법, Perez천공모델, 스넬의 법칙

Keywords : Core Daylighting System, Beam Sunlight System, Daylighting, Optical instrument, Ray-tracing Technique, Perez Sky Model, Snell's Law

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 배경 및 목적

사무소 건물과 같이 사용시간이 주로 주간인 건물에서 주광을 이용하면 조명에너지 감소, 최대 전력부하중 조명부하율 감소, 냉방부하감소 등 여러 가지 잇점이 있는 것은 이미 여러 연구를 통해 잘 알려져 있다. 따라서 주간에 건물 개구부를 통해 삽입되는 주광을 실내 조명원으로 고려하는 연구가 많이 진행되고 있다. 선진 외국의 경우 건물의 코어부분에 광학장치를 이용하여 직달 일사를 도입할 수 있는 태양광전달시스템(Beam Sunlight System)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Mirkovich, 1993; Bennett and Eijadi, 1980; Fraas, Pyle and Ryason, 1983; Learn,

1985; Johnson, 1987). 그러나 우리나라의 경우 이 분야에 대한 연구가 미진한 상태이므로 외국에의 기술 의존도를 낮추기 위하여 기초적인 연구부터 시작해야 하는 단계이다.

본 연구의 주요 목적은 태양광전달시스템의 최적 설계를 위하여 시스템의 성능을 예측해 볼 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하는 것이다. 본 연구에서 개발된 컴퓨터 프로그램은 설계자에게 태양광전달시스템의 기본 구성 요소인 렌즈, 오목거울, 평면거울 등의 광학장치를 제공하고, 설계자가 건물의 특성에 맞추어 광학장치들의 위치와 크기 등을 변경하게 되면 최종적으로 작업면에 도달하는 빛의 양을 계산할 수 있도록 개발되었다.

#### 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 문헌에 의한 이론 연구, 컴퓨터 모델의 개발, 그리고 모형 실험을 통한 컴퓨터 모델의 검증의 순서로 진행되었다. 그림1은 본 연구의 진행과정을 보인 것이다.

\* 정회원, 한양대 건축공학과 교수, 건축학박사

\*\* 정회원, 한양대 대학원, 석사과정

이 연구는 1998-99년도 한국과학재단 98핵심전문연구  
연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

과제번호:981-1211-031-2

## 2. 기본이론의 고찰

### 2.1 Core Daylight System의 개요

CDS란 자연채광이 어려운 사무소 건물의 코어 부분과 지하공간 등의 건물내 깊은 곳에 주광을 효율적으로 전달시켜 주기 위한 주광전달 시스템을 말한다. CDS중 Beam Sunlight System은 태양의 직달성분만을 이용하는 시스템으로 그림2는 외국에서 사용하는 CDS개념도와 적용사례를 보여준 것이다.

국내에서도 태양광 집광장치가 일본과 기술 제휴로 상용화 되어있으며 그림3에서 보는 것과 같이 광섬유를 이용한 방식이며 태양추적 장치가 부착되어 있다. 이미 태양추적장치는 개발되어 있기 때문에 본 연구에서는 태양광이 추적장치에 의해 광학장치의 법선면에 유입하는 것을 전제로 하였다.

### 2.2 Perez 천공 모델

Beam Sunlight System의 성능을 예측하기 위해서는 외부 직사일광의 태양에 대한 법선면 조도를 알아야 하는 것이 무엇보다 중요하다. 현재까지 많은 연구에 의해서 실제 천공상태와 비슷한 천공 모델들이 개발되었으며(DiLaura, 1984) 개발되어 있는 천공 휘도 분포 모델 중 다양한 상태의 천공 조건에 대해 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 모델은 Perez의 모델(Perez et al. 1990)이다. 본 연구에서 Perez모델을 이용하여 1977년부터 1996년 까지의 20년간 태양광의 시각별 법선면 직달조도값을 실제 서울의 기상자료를 입력하여 계산하였으며 결과는 그림4와 같다. 그림4에서 볼 수 있듯이 태양법선면 직달조도값은 연평균 하루 1.5시간이상 50,000 lx를 넘는다. 그러므로 Beam Sunlight System 을 국내에서 사용하면 0.5m<sup>2</sup>의 집광판으로 효율 30%인 시스템 사용시 5\*5m<sup>2</sup>인 공간에 300lx를 제공할 수 있으므로 조명에너지 절약에 큰 공헌을 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 2.3 몬테카를로 방법과 광선 추적법

빛은 에너지이다. 본 연구에서는 한 개의 광자가 일정한 양의 에너지를 가지고 있다고 보고 그 광자가 작업면에 도달할 때까지 얼마만큼의 에너지를 손실했는지를 해석하기 위하여 광선추적법을 사용하였다.

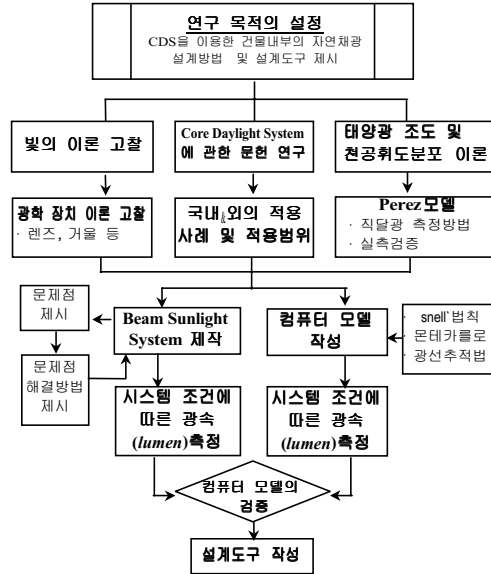


그림1. 연구의 진행방법

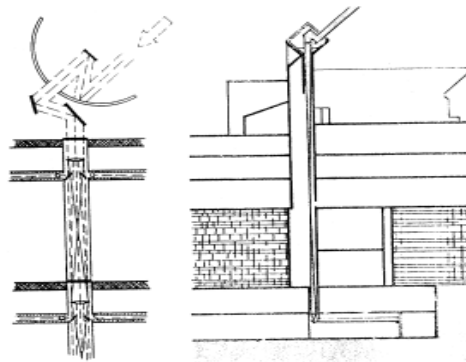


그림2. CDS의 개념도와 적용사례

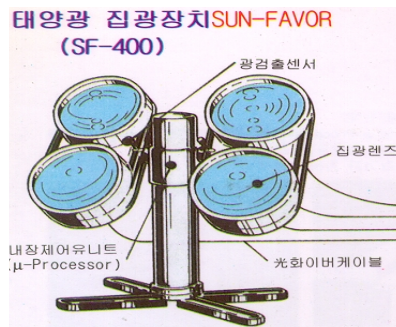


그림3. 태양광집광장치의 예

광선 추적법은 광자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화시켜 공간 내에서 광자의 운동 경로를 수학적으로 예측할 수 있는 기법이다.

따라서 이 방법을 문제 해결에 적용시키기 위해서는 벡터에 대한 기본적인 이론을 이해하고 이 벡터가 공간상의 어떤 평면과 만날 경우, 만나는 점의 교점과 이루는 각 등을 계산하는 식을 알아야 한다. 교차한 면에 대한 빛의 반사 특성, 투과 특성 등과 같은 벡터의 방향이나 크기에 변화를 줄 수 있는 요인 등을 고려하여 벡터의 새로운 방향과 크기를 결정하게 된다. 이때 반사 또는 투과되는 광자의 방향은 몬테카를로 방법에 의해 난수를 발생시켜 확률적인 방법으로 결정하게 된다(김재삼, 1997).

#### 2.4 집광장치의 개념도

태양광선을 집광하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있지만 그림5와 같이 두 개의 수렴렌즈를 이용하는 방법과 그림6과 같이 한 개의 오목거울과 한 개의 수렴렌즈를 이용하는 방법이 가장 보편적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 그림6의 방법을 채택하였으며 컴퓨터 모델의 검증을 위해 실제로 제작하여 실험을 행하였다.

### 3. 광학장치에서의 빛의 거동 해석

#### 3.1 직선과 평면의 만남

우선 3차원 공간상에서 진행되는 하나의 광자를 3차원 직선의 식으로 나타낼 수 있으며 광자가 부딪히는 면을 평면 방정식으로 나타낼 수 있다. 이때 직선의 방정식은 식(1)또는(2)와 같다.

$$\frac{x-x_0}{L} = \frac{y-y_0}{M} = \frac{z-z_0}{N} \quad (1)$$

$$\frac{x-x_0}{dx} = \frac{y-y_0}{dy} = \frac{z-z_0}{dz} = t \quad (2)$$

( $x = x_0 + dx*t, y = y_0 + dy*t, z = z_0 + dz*t$  로 변형된다)

그리고 평면의 방정식은 식(3)과 같다.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3)$$

(여기서 A,B,C 는 법선의 방향비가 된다)

식(4)에 의해 t를 구하고 직선의 방정식에 대입하여 좌표(x,y,z)을 구하고 이좌표(x,y,z)가 평면상에 존재하는지를 검사함으로써 직선과 평면이 교차하는지의 여부를 결정할 수 있게 된다.

$$t = \frac{-(Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D)}{A*dx + B*dy + C*dz} \quad (4)$$

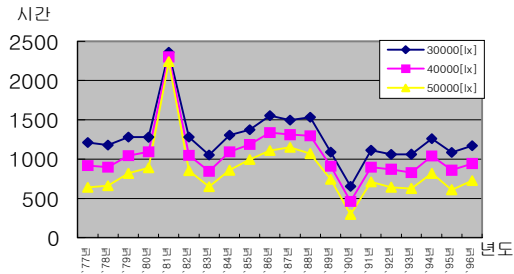


그림4. 20년간 법선면 직사일광 조도의 출현시간

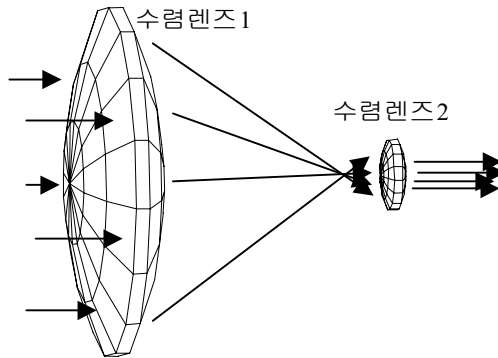


그림5. 두개의 수렴렌즈에 의한 집광방법

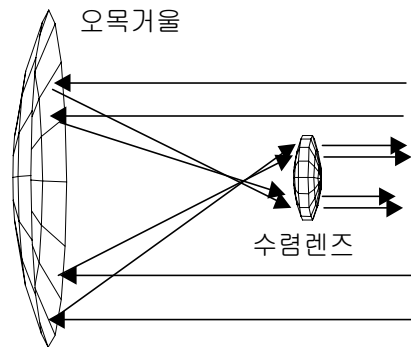


그림6. 오목거울과 수렴렌즈에 의한 집광방법

#### 3.2 평면에서 반사한 광자의 방향 결정

평면에서 광자의 반사는 평면과 입사한 광자가 교차하는 점에서의 법선 벡터(Z축)에 대하여 180도 회전시키면 된다. 평면의 법선 벡터에 대한 회전을 하기 위하여 법선 벡터를 임의의 축(x,y,z)과 평행하도록(여기서는 Z축) 회전 이동 시킨 후

에 이 회전에 이용된 매트릭스를 그대로 같이 직선의 벡터에 적용하면 반사된 벡터를 구하게 된다. 즉, 그림7과 같이 임의의  $(dx, dy, dz)$ 라는 벡터를  $z$ 축과 평행하도록 만들기 위해서 먼저  $V_{i0}(\phi, r, \Delta)$ 를 구한다. 다음  $-\phi$ 만큼  $z$ 축에 대하여 회전하며  $V_{ii}(0, r, \Delta)$ 이 되며, 다시  $-\Delta$ 만큼  $y$ 축에 대하여 회전시키면  $z$ 축이 된다(권택연외1명, 1976). 이러한 벡터는 식(5),(6)의 매트릭스에 의해 회전이동한다.

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

그다음 이 회전에 이용된 매트릭스를 그대로  $Z$ 축으로 회전이동된 벡터에 적용하면 평면의 법선면에 반사된 벡터를 구할 수 있다.

### 3.3 직선과 구의 만남

블록렌즈의 양면은 그림8과 같이 서로 다른 직경을 갖는 두 개의 구가 교차하여 만들어지는 것으로 간주할 수 있다.

이 경우 직선의 방정식은 식(2)와 같고 구의 방정식은 식(7)로 표현된다.

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = r^2 \quad (7)$$

이를  $t$ 에 대하여 풀면 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} &(dx \cdot dx + dy \cdot dy + dz \cdot dz) t^2 \\ &+ 2t[dx(x_0-a) + dy(y_0-b) \\ &+ dz(z_0-c)] + (x_0-a)^2 + (y_0-b)^2 \\ &+ (z_0-c)^2 - r^2 = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$t$ 는 2차 방정식이므로 식(9)를 적용시키면  $t$ 를 구할 수 있다.

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (9)$$

$t$ 가 2개이면 구의 두점에서 접치는 것이므로 이중 가까운 값을 취하면 된다. 만일  $b^2 - 4ac$ 가 음수이면 직선과 구면이 만나지 않는 것이다.

### 3.4 렌즈에서의 굴절

렌즈에서의 굴절은 식(10)과 같이 스넬의 법칙을 이용하여 해석할 수 있다. 그림9는 스넬의 법칙에 의해 빛의 굴절되는 경로를 보인 것이다.

렌즈를 통과하는 빛의 경로를 구하기 위하여 먼저 광자가 부딪히는 구면(렌즈의 한쪽면)의 법선을 구한다. 이는 식(11)과 같이 중점과 교차점으로 쉽게 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} n \sin \theta_1 = n' \sin \theta_2 \\ n \sin \theta_4 = n' \sin \theta_3 \end{pmatrix} \quad (10)$$

단,  $n$ : 공기의 굴절률 ( $\approx 1$ ).  $n'$ : 유리의 굴절률 ( $\approx 1.5$ )  
 $\theta_1, \theta_3$ : 입사각.  $\theta_2, \theta_4$ : 굴절각

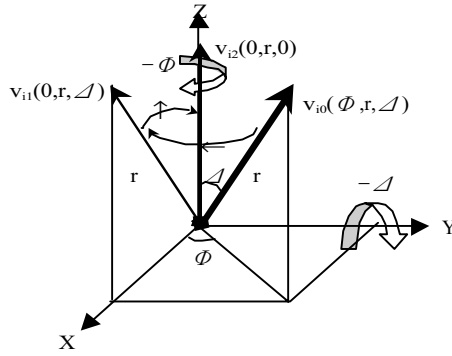


그림7. 반사광선의 벡터 계산

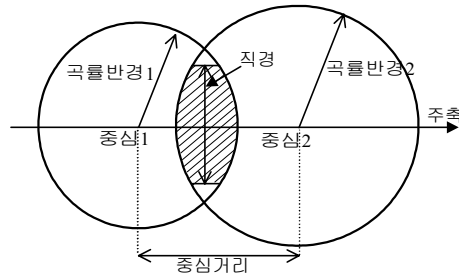
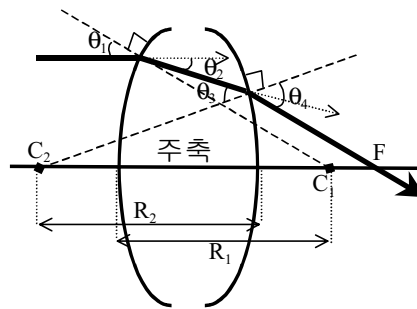


그림8. 두 개의 원을 이용한 블록렌즈의 표시방법



( $R_1, R_2$ 는 반경을 나타내며  $C_1, C_2$ 는 구의 중심을 나타낸다)

그림9. 렌즈를 통과하는 빛의 경로

$$\begin{pmatrix} dx = x - cx \\ dy = y - cy \\ dz = z - cz \end{pmatrix} \quad (11)$$

(dx, dy, dz: 법선 벡터, x,y,z: 교차점, cx,cy,cz: 구의 중심)

다음 이 법선을  $-\theta$  만큼 z 축에 대하여 회전,  $-\Delta$  만큼 y축에 대하여 회전 시키면 z축이 된다. 마찬가지로 광자의 벡터도 같은 각도로 회전 시킨다. 그 다음 z 축과의 각도를 그림10과 같이 식 (12)를 이용하여 계산한다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right) \quad (12)$$

식(13)과 같이 스넬의 법칙인 굴절률을 이용해서  $\theta_2$ 가 나온다.

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n \sin \theta_1}{n'}\right) \quad (13)$$

$\theta_2$ 를 이용해서 식(14)로  $z'$ 를 구한다.

$$z' = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\tan \theta_2} \quad (14)$$

dx,dy는 그대로 쓰고 dz'만 변화시켜준다(길이는 달라지지만, 방향은 동일하고, 계산이 빠르다). 이를 다시  $\Delta$  만큼 y축에 회전,  $\theta$ 만큼 z축에 대하여 회전 시키면 원래대로 돌아온다.

### 3.5 오목거울에서의 빛의 반사

그림11과 같이 오목거울의 초점거리(F)는 중심(=반경,C)의 1/2이며 오목거울에서의 빛의 반사는 3.2절에서 언급한 광자의 평면에 대한 반사와 같은 방법으로 해석할 수 있다.

## 4. 태양광 집광장치의 성능 예측 컴퓨터 프로그램 개발

### 4.1 컴퓨터 프로그램 개요

본 연구에서 개발한 컴퓨터 프로그램이 기본적으로 설계자에게 제공하는 태양광전달시스템의 구성 요소는 그림12와 같다. 그림13은 컴퓨터 프로그램의 광선추적 알고리즘을 보인 것이다.

### 4.2 컴퓨터 프로그램의 적용에

본 연구에서 개발한 프로그램의 초기화면은 그림14와 같다. 초기화면에 실측에서 사용되었던 각 광학장치의 제원을 표1과 같이 설정하여 그림15의 입력모듈에 입력후 1000개의 광자를 발산하여

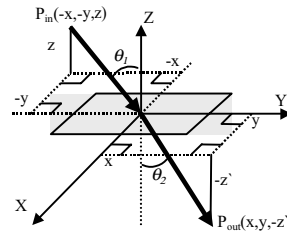


그림10. 매질에 입사하는 빛의 경로

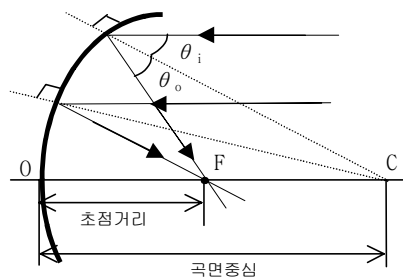
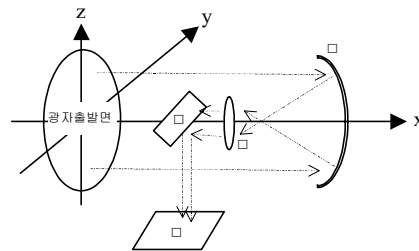


그림11. 오목거울에 반사되는 빛의 경로



단, ① : 오목거울 ② : 수렴렌즈  
③ : 평면 반사거울 ④ : 작업면

그림12. 광학시스템의 구성요소

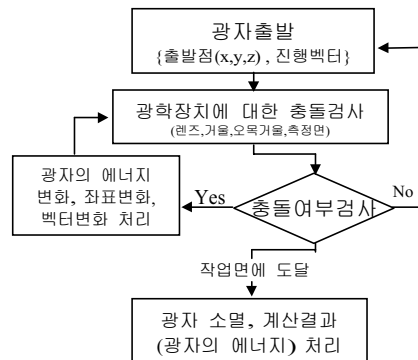


그림13. 컴퓨터 프로그램의 광선 추적 알고리즘

프로그램을 실행시키면 그림16과 같이 광자의 경로를 가시화하며 실행한다. 표2는 작업면 입사광속의 계산결과를 보인 것이다. 그 값의 분포는 그림17에서 보는 바와 같다.

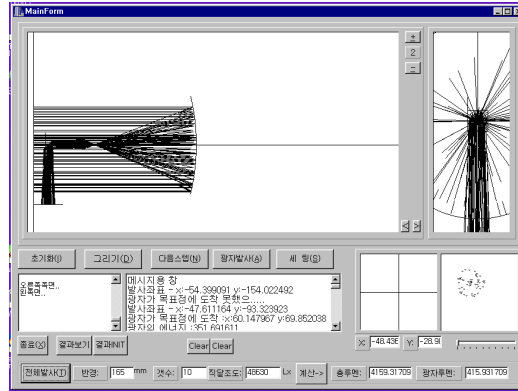


그림16. 프로그램 실행 화면

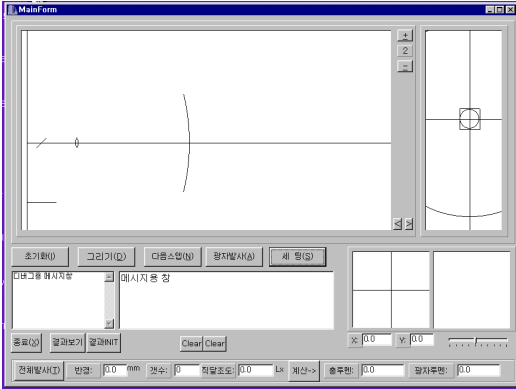


그림14. 프로그램 바탕화면

표2. 작업면 입사광속의 계산 결과

y축 \ x축	x축									
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10
y1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
y2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
y3	0.0	0.0	0.0	20.6	79.5	72.6	6.5	0.0	0.0	0.0
y4	0.0	0.0	5.6	101.1	76.4	101.0	112.9	16.1	0.0	0.0
y5	0.0	0.0	62.0	112.1	164.3	192.5	95.6	76.1	0.0	0.0
y6	0.0	0.0	76.1	58.8	187.3	174.5	141.1	58.5	0.0	0.0
y7	0.0	0.0	12.0	163.3	89.1	103.6	111.3	0.0	0.0	0.0
y8	0.0	0.0	0.0	10.1	84.2	91.3	0.0	0.0	0.0	0.0
y9	0.0	0.0	0.0	21.6	81.5	74.6	0.0	0.0	0.0	0.0
y10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

표1. 광학장치 입력요소 및 입력값

입력요소 및 입력값					
렌즈	직경	33mm	평면 거울	반사율	0.97
	곡률반경1	40mm		회전각도	45°
	곡률반경2	40mm		너비	34mm
	중심간격	70mm		높이	50mm
	굴절율	1.50		측정면	너비
오목 거울	직경	330mm	반산 광자	높이	100mm
	곡률반경	700mm		갯수	1,000
	반사율	0.97		법선면 조도	48,630lx



그림15. 광학장치 제원 입력모듈 화면

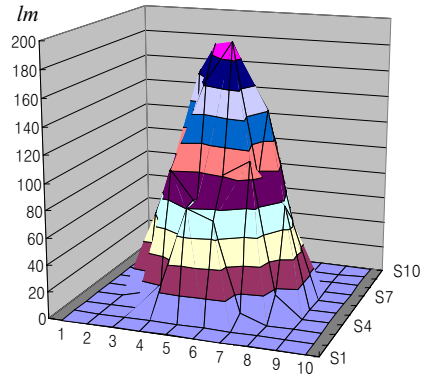


그림17. 작업면 입사광속의 계산 결과

## 5. 축소모형실험을 통한 컴퓨터 프로그램의 타당성 검증

### 5.1 축소 모형 실험의 개요

본 연구에서 개발한 태양광 집광장치의 성능 예측 컴퓨터 프로그램의 정확성을 검증하기 위해 축소 모형을 이용한 실험을 행하였다.

그 결과 그림18에서 보는 바와 같이 빛이 집광되고 있음을 알 수 있다. 여기에서 주목할 점은 오목거울의 바깥쪽 부분의 빛이 볼록렌즈에 도달되지 않고 옆으로 지나가는 것을 볼 수 있으며 그림16에서 보듯이 컴퓨터 프로그램 상에서 정확하게 모델링 되었다.

### 5.2 측정치와 계산치의 비교

그림19는 태양광전달시스템의 광학장치에 의해 집광 및 전달된 직사일광을 평면거울을 이용하여 작업면에 반사시키면서 작업면상의 조도를 측정하는 모습을 보인 것이다.

표3은 청천공 상태에 대해서 태양광전달시스템에서의 측정치와 컴퓨터 프로그램에 의한 계산치를 비교한 것이다. 표3에서 평균 오차율은 식(15)에 의해 계산한 것이다.

표3. 측정치와 컴퓨터 모델 계산치의 오차

모델	태양광 유입광속	작업면으로의 유입광속	오차율
측정모델	4157.16lm	2588.32lm	9.51%
컴퓨터모델	4157.16lm (측정치를 입력)	2834.47lm	

(단, 거울반사율 : 0.97 Rivero공식  $T_0$  값: 0.947 )

$$\epsilon(\text{오차율}) = \frac{| \text{측정값} - \text{계산값} |}{\text{측정값}} \times 100(\%) \quad (15)$$

작업면으로 유입되는 광속에 대한 측정치와 계산치 사이에 약 9.5%의 오차가 발생하였는데 이는 실험에 이용된 광학장치 중에서 오목거울의 제작상의 오차에 기인하는 것으로 사료되었다. 즉, 컴퓨터 프로그램에 의해 모델링한 오목거울은 완전구면이지만 본 실험을 위해 사용된 오목거울은 그림18에서 보이는 바와 같이 초점이 한점에 모이지 않는 문제를 갖고 있었다.

따라서 컴퓨터 프로그램에 의해 계산된 값이 실측에 의한 값보다 큰 것으로 나타났다. 그러나 오차의 범위가 10%를 넘지 않는 점을 고려할 때

본 연구에서 개발한 컴퓨터 프로그램이 설계단계에서 시스템의 다양한 방안들에 대한 비교평가는 물론 공학적인 설계도구로서도 가치가 있을 것으로 사료된다.



그림18. 집광장치 실험



그림19. 작업면 조도측정

## 6. 태양광전달시스템의 열처리 및 광선합성시스템

일사중 적외선 부분의 집광으로 인해 발생하는 열의 차단방법은 그림20과 같이 1차로 적외선 차단 코팅 유리를 사용하여 일정량의 적외선을 차단하고, 2차로 석영봉 내부로 빛을 통하게 하면 열을 뺏을 수 있다. 이것은 임계각에 대한 특성을 이용하여 발생열을 줄이는 것으로 빛이 임계각보다 큰 값으로 입사할 시에 석영봉 내부에서 100% 전반사 하여 반대쪽으로 빛을 전달하며 이때 열을 빼앗게 된다.

태양광 전달 시스템을 건물에 적용할 경우 다수의 집광장치에 의해 집광된 태양광을 하나의

광덕트에 합성할 필요가 있는데 이는 그림21에서 보인 바와 같은 광선합성장치에 의해 가능할 것으로 사료되며 이 원리는 담천공시 인공조명원을 이용하여 보조 조명기구의 제작에도 적용가능할 것으로 현재 연구가 진행중이다.

### 7. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 광학장치를 이용한 태양광 전달 시스템의 성능을 예측할 수 있는 컴퓨터 모델을 개발하였으며, 모형 실험을 통해 그 정확성을 검토하였다. 검토 결과 본연구에서 개발한 컴퓨터 프로그램은 태양광전달시스템의 설계는 물론 시스템의 성능을 정량적으로 예측하는데 이용가능할 것으로 검증되었다.

계산치가 측정치보다 9.5%정도 높은 값을 보이는 이유는 구형 오목거울은 평행광선을 하나의 초점에 집중시키는 특성이 있으나 국내 오목거울의 제작상 문제점으로 초점이 한곳에 정확히 모이지 않아 미세한 굴곡으로 빛이 손실되기 때문인 것으로 사료된다.

또한 직달일사의 집광시 열발생에 대한 문제점의 해결책을 제시하였으며 하나의 광덕트에 여러 개의 태양광전달시스템을 연결할 수 있는 광선합성장치의 개념을 소개하였다.

이번 연구에서 개발된 컴퓨터 프로그램에서는 집광된 빛을 작업면에 분산시키는 장치에 대한 것은 포함되지 않았다. 이 부분에 대한 연구를 계속 진행하고 있다.

#### 참고문헌

1. 김재삼. 몬테카를로 방법의 물리학적응용, 민음사, 서울, pp13~74, 1997.
2. 권택연, 임정대. 대수·기하학, 문운당, 서울, pp203~204, 1976.
3. Mirkovich, D.J. 1993. *Assessment of Beam Lighting Systems for Interior Core Illumination in Multi-Story Commercial Buildings*, ASHRAE Transactions, Vol. 99, Part1, pp.1106-1116.
4. Frass, L.M.; W.R. Pyle; and P.R. Ryason. 1983. *Concentrated and Piped Sunlight for Indoor Illumination*, Applied Optics, Vol. 22, No. 4, pp.578-582.
5. Bennett, D.J. and D.A. Eijadi. 1980. *Solar Optics: Light as energy; Energy as light*,

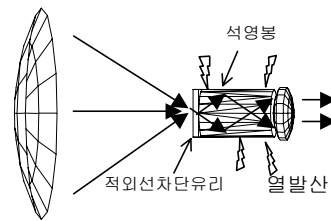


그림20. 집광시 태양광의 열처리 장치

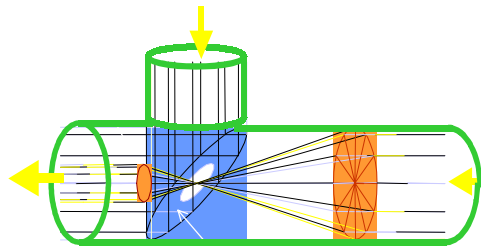


그림21. 광선합성기 원리

Underground Space, Vol. 4., No. 6, pp.349-354.

6. Learn, M. 1985. *A new Economics for Solar Energy: Core Daylighting with Heliostats*, Proc. American Solar Energy Society Conference, October, pp.119-123.
7. Johnson, K. 1987. *Core Daylighting Transport Systems*, LBL Windows and Daylighting Group, June.
8. Perez, R.; P. Ineichen; R. Seals; J. Michalsky; and R. Stewart. 1990. *Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance*, Solar Energy, Vol. 44, No. 5, pp.271-289.
9. DiLaura, D.L., 1984. *Recommended Practice for the Calculation of Daylight Availability*, Journal of the IES, pp.381-392.
10. Rivero, R. 1958. *The Calculation of the Direct Daylight Factor for Glazed and Unglazed Windows and for Uniform and Non-Uniform Skies*, Building Research Station Library Communication No.860(as cited by Hopkinson, R.G.; P. Peterbridge; and J. Longmore. 1966. Daylighting, William Heinemann, Ltd., London, UK. p.93).