

光學裝置를 갖는 太陽光傳達시스템의 數値모델 開發에 관한 연구

Developing a Numerical Model of Beam Sunlight Systems with Optic Devices

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

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 might 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. 기존의 자연채광 연구는 년중 거의 일정한 확산천공광의 값에 따른 비율로 실내조도 분포를 산정하여 에너지 절감으로 연결시키는데 초점을 맞추었다(최안섭,1997). 그리고 시각별로 변화폭이 큰 직달일사의 도입을 위한 연구는 주로 건물외부창 근처에서 루버, 반

사판, 광덕트, 튜브 등을 이용하는데 초점을 맞추고 있다(서광범,1996). 한편 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, 오폭거울, 평면거울 등의 광학장치를 제공하고, 설계자가 건물의 특성에 맞추어 광학장치들의 위치와 크기 등을 변경하게 되면 최종적으로 작업면에 도달하는 빛의 양을 계산할 수 있도록 개발되었다.

* 정회원, 한양대 대학원, 석사과정

** 정회원, 한양대 건축공학과 교수, 건축학박사

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

과제번호:981-1211-031-2

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 문헌에 의한 이론 연구, 컴퓨터 모델의 개발, 그리고 모형 실험을 통한 컴퓨터 모델의 검증의 순서로 진행되었다. [그림1]은 본 연구의 진행과정을 보인 것이다.

2. 기본이론의 고찰

2.1 Core Daylight System의 개요

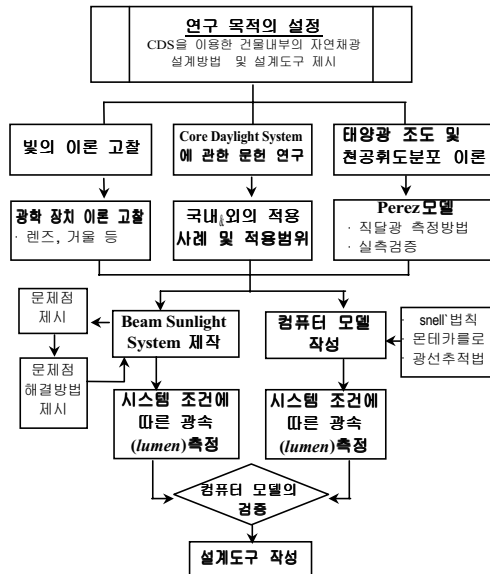
CDS란 자연채광이 어려운 사무소 건물의 코어 부분과 지하공간 등의 건물내 깊은 곳에 주광을 효율적으로 전달시켜 주기 위한 주광전달 시스템을 말한다. CDS중 Beam Sunlight System은 태양의 직달성분만을 이용하는 시스템으로 [그림2]는 외국에서 사용하는 CDS개념도와 적용사례 보여준 것이다.

국내에서도 태양광 집광장치가 일본과 기술 제휴로 상용화 되어있으며((주)우일신소재) [그림3]에서 보는 것과 같이 광섬유를 이용한 방식으로 태양추적 장치가 부착되어 있다. 이미 태양추적 장치는 개발되어 있기 때문에 본 연구에서는 태양광이 추적장치에 의해 광학장치의 법선면에 유입하는 것을 전제로 하였다.

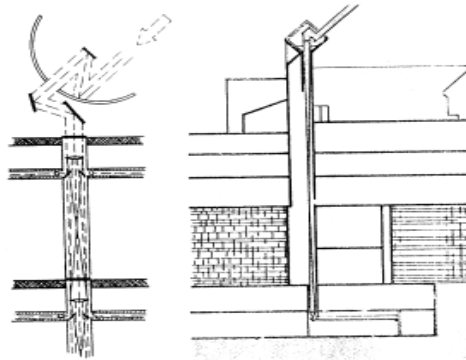
2.2 Perez 천공 모델

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, Perez, 1993) 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, 1993)이다. 본 연구에서 Perez모델을 이용하여 1977년부터 1996년 까지의 20년간 태양광의 시각별 법선면 직달조도값을 실제 서울의 기상자료를 입력하여 계산하였으며 결과는 [그림4]과 같다.

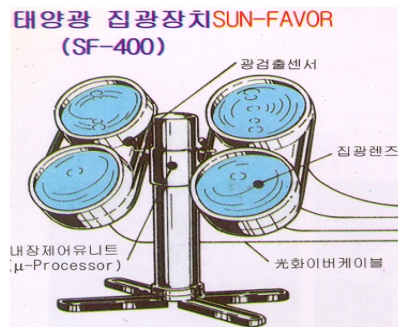
[그림4]에서 볼 수 있듯이 태양법선면 직달조도값은 연평균 하루 1.5시간이상 50,000 lx를 넘는다. 그러므로 Beam Sunlight System을 국내에서 사용하면 0.5m²의 집광판으로 효율 30%인 시스템 사용시 5*5m²인 공간에 300lx를 제공할 수 있으므로 조명에너지 절약에 큰 공헌을 할 수 있을 것으로 사료된다.



[그림1] 연구의 진행방법



[그림2] CDS의 개념도와 적용사례



[그림3] 국내 태양광집광장치

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. 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(유기형, 1997).

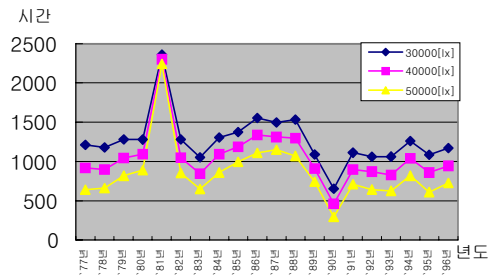
2.4 집광장치의 개념도

태양광선을 집광하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있지만 [그림5]와 같이 두 개의 수렴렌즈를 이용하는 방법과 [그림6]과 같이 한 개의 오목거울과 한 개의 수렴렌즈를 이용하는 방법이 가장 보편적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 [그림6]의 방법을 채택하였으며 컴퓨터 모델의 검증에 위해 실제로 제작하여 실험을 행하였다.

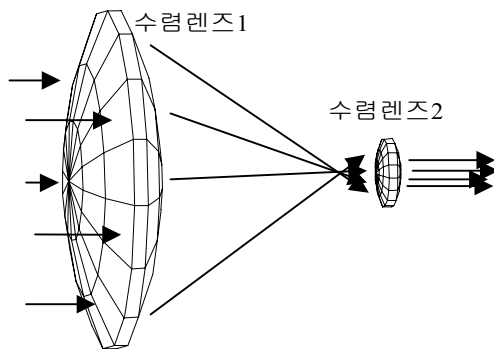
3. 태양광 집광장치의 성능 예측 컴퓨터 프로그램 개발

3.1 컴퓨터 프로그램 개요

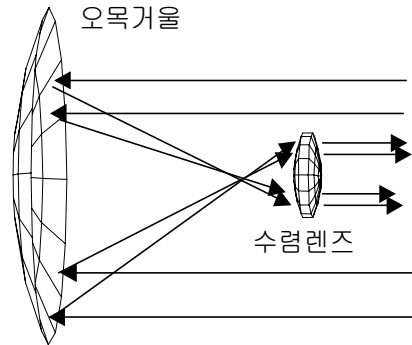
본 연구에서 개발한 컴퓨터 프로그램이 기본적으로 설계자에게 제공하는 태양광전달시스템의 구성 요소는 [그림7]과 같다. [그림8]은 컴퓨터 프로그램의 광선추적 알고리즘을 보인 것이며 표 1은 입력요소를 보인 것이다.



[그림4] 20년간 법선면 직사일광 조도의 출현시간



[그림5] 두개의 수렴렌즈를 통한 집광방법



[그림6] 오목거울과 수렴렌즈를 통한 집광방법

3.2 컴퓨터 프로그램의 적용에

본 연구에서 개발한 프로그램의 초기화면은 [그림9]와 같다. 초기화면에 각 광학장치의 재원을 [그림10]과 같이 설정하여 프로그램을 실행시키면 [그림11]과 같이 실행하여 [그림12]와 같은 결과를 구할 수 있다.

4. 축소모형실험을 통한 컴퓨터 프로그램의 타당성 검증

4.1 축소 모형 실험의 개요

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

그 결과 [그림13]에서 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 [그림11]에서 보듯이 컴퓨터 프로그램 상에서 정확하게 모델링 되었다.

4.2 측정치와 계산치의 비교

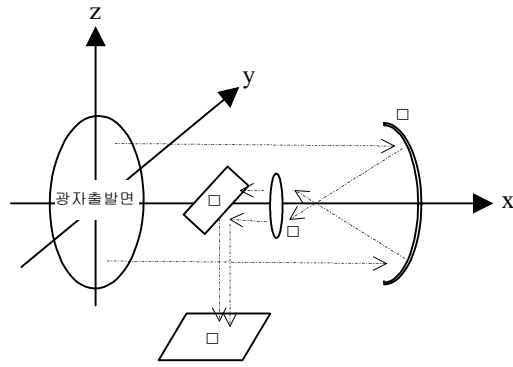
[그림14]는 태양광전달시스템의 광학장치에 의해 집광 및 전달된 직사일광을 평면거울을 이용하여 작업면에 반사시키면서 작업면상의 조도를 측정하는 모습을 보인 것이다.

표2은 청천공 상태에 대해서 태양광전달시스템에서의 측정치와 컴퓨터 프로그램에 의한 계산치를 비교한 것이다. 표2에서 평균 오차율은 식(1)에 의해 계산한 것이다.

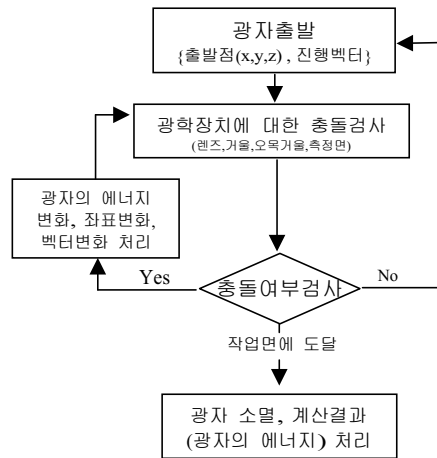
$$\text{오차율} = \left| \frac{\text{측정치} - \text{계산치}}{\text{측정치}} \right| \times 100(\%) \quad \text{식(1)}$$

작업면으로 유입되는 광속에 대한 측정치와 계산치 사이에 약 8~9%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 [그림14]에서 보이는 바와 같이 초점이 한점에 모이지 않는 문제를 갖고 있었다.



단, ① : 오목거울 ② : 수렴렌즈
③ : 평면 반사거울 ④ : 작업면
[그림7] 광학시스템의 구성요소



[그림8] 컴퓨터 프로그램의 광선 추적 알고리즘

표1 프로그램 입력요소

| 입력요소 | |
|------|-------------------------|
| 렌즈 | 직경, 두면곡률반경, 중심거리간격, 굴절율 |
| 평면거울 | 반사율, 회전각도, 너비, 높이 |
| 오목거울 | 직경, 곡률반경, 반사율 |
| 측정면 | 너비, 높이 |
| 광자 | 광자갯수, 법선면 직사일광조도 |

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.

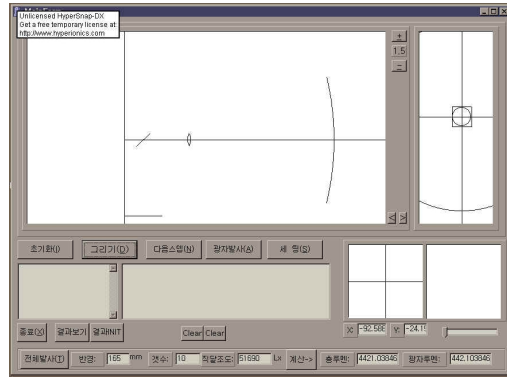
5. 결 론

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

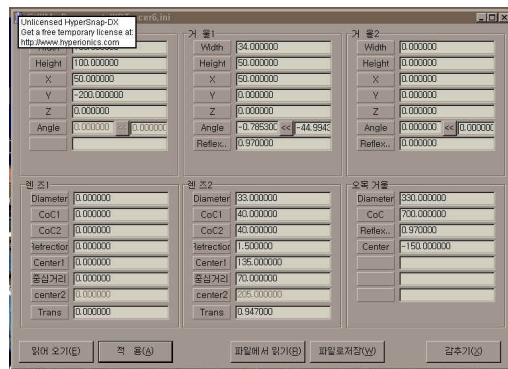
이번 연구에서 개발된 컴퓨터 프로그램에서는 집광된 빛을 작업면에 분산시키는 장치에 대한 것은 포함되지 않았다. 이 부분에 대한 연구를 계속 진행하고 있다.

참고문헌

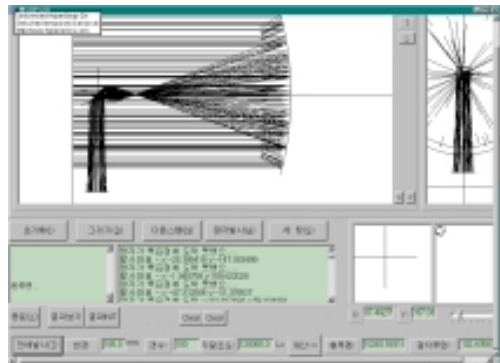
1. 서광범. 지하공간의 자연채광을 위한 광덕트 시스템의 설계에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 1996.
2. 유기형. 몬테카를로 방법과 광선추적기법에 의한 아트리움의 자연채광 성능 예측에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 1997.
3. 최안섭. 주광센서 연동제어시스템의 분석을 위한 컴퓨터 수치모델의 개발 및 검증, 대한건축학회 논문집13권 9호, pp173~184, 1997
4. 서울대학교 광학연구회. 현대광학, 교문사, 서울, pp11~80, 1997.
5. 권택연, 임정대. 대수·기하학, 문운당, 서울, pp203~204, 1976.
6. 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.
7. 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.



[그림9] 프로그램 바탕화면

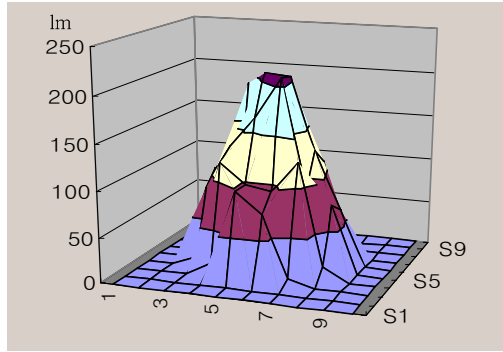


[그림10] 광학장치 재원 설정 화면



[그림11] 프로그램 실행 화면

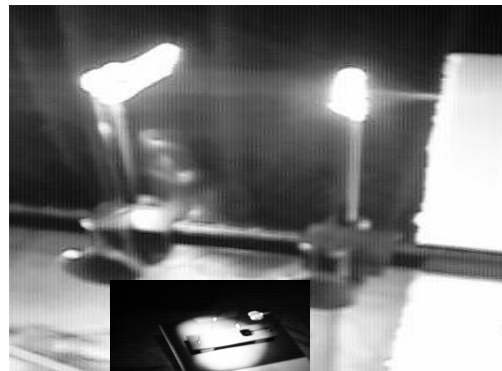
7. Bennett, D.J., and D.A. Eijadi. 1980. "Solar Optics: Light as energy; Energy as light," *Underground space* Vol 4., No. 6, pp.349-354.
9. Learn, M. 1985. "A new Economics for Solar Energy: Core Daylighting with Heliostats," *Proc. American Solar Energy Society Conference*, October, pp.119-123.
10. Johnson, K. 1987. "Core Daylighting Transport Systems", LBL Windows and Daylighting Group, June.
11. 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.
12. DiLaura, D.L., 1984 "Recommended practice for the calculation of daylight availability" *Journal of the IES*, pp381-392.
13. Perez,R.;R.Seals; and J.Michalsky.1993. "Modeling Skylight Angular Luminance Distribution from Routine Irradiance Measurements", *Journal of the IES*, Vol.22, No.1, pp.10-17.
14. 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).



[그림12] 작업면 조도의 시뮬레이션 결과



[그림13] 집광장치 실험



[그림14] 작업면 조도측정

표2 측정치와 컴퓨터 모델 계산치의 오차

| 모델 | 태양광 유입광속 | 작업면으로의 유입광속 | 오차율 |
|-------|------------------------|-------------|-------|
| 측정모델 | 4157.16lm | 2588.32lm | 8.68% |
| 컴퓨터모델 | 4157.16lm (측정치를 입력) | 2834.47lm | |

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

