

이중 블라인드 광파이프 주광 조명시스템 효율 및 조명에너지 절감량 평가 연구

강은철*, 유성연**, 이의준***

*한국에너지기술연구원(kec8008@kier.re.kr), **충남대학교 기계설계공학과(syyooh@cnu.ac.kr),
***한국에너지기술연구원(ejlee@kier.re.kr)

Evaluation Study of a Double Blind Light Pipe Daylighting System Efficiency and an Illumination Energy Reduction

Kang, Eun-Chul* Yoo, Seong-Yeon** Lee, Euy-Joon***

*Korea Institute of Energy Research(kec8008@kier.re.kr),
**Dept. of Mechanical Design, Chungnam National University(syyooh@cnu.ac.kr),
***Korea Institute of Energy Research(ejlee@kier.re.kr)

Abstract

A DBLP(Double blind light pipe) daylight system can be installed at a building exterior wall or roof to replace artificial light during the day time. This system was consisted of a double blind light collector, a mirror duct type light transformer and a prism light pipe distributor. The double blinds were used to track the sun's altitude and azimuth movements to collect the sunlight throughout the day. The sunlight collected by the light collector was reflected on the first mirror and the second mirror and sent to the light pipe through the light transformer. The transformer was designed to deliver the sunlight into the light pipe efficiently. The light distributor plays a role in diffusing the sunlight coming in through the light collector to be used for indoor lighting. In this paper, a DBLP system has been designed, installed and tested at a KIER daylighting twin test cell. The DBLP daylighting system was applied to the experimental test cell which has an indoor area of 2.0 m wide × 2.4 m height × 3.8 m length. The experiment was conducted from January 30 to February 27, 2012, under clear skies and partially cloudy skies. Data was collected from 10:00 am to 16:00 pm every 2 minute and the average was calculated for every 30 minute of the data collection to obtain the system efficiency. The results indicated that the DBLP system efficiency was evaluated as 11.67%. The DBLP system indoor illumination energy reduction was predicted as 0.822 kWh/day. This could replace 4 sets of a 32W fluorescent lamp operating 6.4 hours per a day.

Keywords : Double blind light pipe(이중블라인드광파이프), Daylighting(주광), Light collector(집광부), Light transformer(전송부), Light distributor(산광부)

Submit date : 2012. 10. 10, Judgment date : 2012. 10. 18, Publication decide date : 2013. 2. 22
Communication author : Lee, Euy-Joon(ejlee@kier.re.kr)

기 호 설 명

η	: 광전송 효율 [%]
ϕ	: 광속 [Lumens]
A	: 면적 [m^2]

하 첨 자

C	: 집광부 (Collector)
T	: 전송부 (Transformer)
D	: 산광부 (Distributer)
i	: 입구부 (input)
o	: 출구부 (output)

1. 서 론

햇빛은 조명 역할 이외에도 살균, 소독, 정화 및 생육 등에 직접적인 영향을 미치고 있으며, 실내 재실자에게는 심리적 안정감을 제공하고 상대적으로 피로감을 줄여주는 역할을 한다. 또한 실내조명에 햇빛을 사용하게 되면 실내조명 부하를 낮출 수 있어, 건물에너지 절감 효과를 기대할 수 있다.¹⁾ 이러한 주광 조명은 건물의 창을 통해 주로 이뤄져오고 있으나, 최근에는 창 이외의 공간을 활용한 다양한 방식의 주광조명 기술이 개발되고 있다. 국내에서 개발된 광섬유를 이용한 주광 조명 기술(Kang, E. C.)²⁾은 원거리까지 햇빛을 전송할 수 있으나, 고집광형으로 자연광 고유의 특성을 유지하기 어렵고, 선형 프레넬 필름을 활용한 광파이프 주광 조명 기술(Choi, Y. J.)³⁾은 자연광 고유의 특성을 잘 유지할 수 있으나 효율이 5% 내외로 낮게 나타나고 있다. 이에 Alvin, W.는 이중 블라인드

주광 조명 기술에 대한 기초 연구⁴⁾를 수행하였고, 특히 Kang, E. C.은 광학해석 프로그램을 이용하여 이중 블라인드 주광 조명 기술에 대한 설계 가이드를 제시하였다⁵⁾. 일본에서 개발된 렌즈와 광섬유를 이용한 자연채광 기술은 시스템 효율은 높게 나타나지만, 시스템이 복잡하고, 태양빛의 양이 적다. 이에 비해 이중 블라인드 주광 조명 기술은 시스템이 단순하고 많은 양의 주광을 실내조명에 활용할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 Kang, E. C.이 제시한 이중 블라인드 주광 조명시스템 설계 자료를 기반으로 태양을 2축으로 추적하는 이중 블라인드 집광장치와 덕트형 광 전송장치, 그리고 산광장치로 구성된 이중 블라인드 광파이프(DBLP; Double blind light pipe) 주광 조명 시스템에 대하여 실증 건물에 적용하고 시스템에 대한 성능을 평가하고자 한다.

2. DBLP Daylighting 시스템

이중 블라인드 광파이프(DBLP; Double blind light pipe) 주광 조명 시스템은 낮 동안에 주광을 실내조명에 활용하기 위하여 건물 외벽이나 지붕에 집광장치(Light collector)를 설치하여 태양빛을 집광한 후 전송장치(Light transformer)를 통하여 실내로 연결된 산광장치(Light pipe distributor)로 태양빛을 전송하는 기술이다. 이러한 이중 블라인드 광파이프 주광 조명 시스템은 Fig. 1과 같이 크게 집광부와 전송부, 산광부로 구성되며, 집광부에는 태양의 위치를 추적하기 위한 추적부가 포함된다.

1) 이 밖에도 햇빛은 생활환경 개선, 질병치료 및 예방, 살균 탈취, 범죄 예방 등 다양한 분야에서 그 효용성을 인정받고 있다.
 2) 한국태양에너지학회, 원형 프레넬 집광형 POF 주광 조명시스템 성능 평가 연구, 한국태양에너지학회논문집, 2011, Vol.31, No.1, pp.31-36
 3) 대한기계학회, LFLP와 DBLP 자연채광시스템의 성능평가 비교 연구, 대한기계학회논문집 B권, 2011, 제35권 제8호, pp.799-804

4) 태양에너지학회, Development of New Solar Collection System for Light Pipe Technology, 한국태양에너지학회춘계학술발표회논문집, pp.117-124
 5) 대한설비공학회, Tracepro를 활용한 이중 블라인드 광파이프 채광 시스템의 블라인드 설계 및 시스템 효율 평가, 설비공학회논문집, 2012, 제24권 제6호, pp.515-520

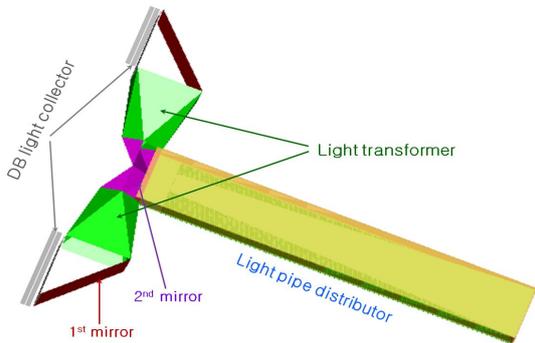


Fig. 1 DBLP daylighting system concept.

2.1 DBLP 집광부

집광부는 태양빛을 집광하여 수집하는 장치로써 위치 추적 장치와 이중 블라인드(DB; Double blind) 형태의 집광장치로 구성된다. 위치 추적 방식은 시간별 태양 위치를 프로그램화하여 추적하는 방식이며, 이중 블라인드 집광부는 태양의 고도추적용 블라인드와 방위각 추적용 블라인드가 Fig. 2와 같이 앞뒤로 배치되어 태양 빛을 전송장치에 수직으로 보내주기 위한 장치이다.

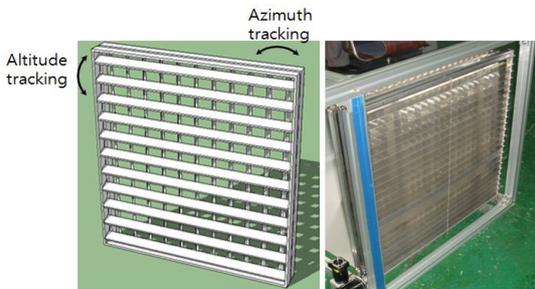


Fig. 2 Double blind light collector.

Table. 1 DB light collector parameters

Collector size [cm]		70×70
Total area [m ²]		0.98
Surface reflectance [%]		99.5
Blind length [cm]		5
Blind gap [cm]	Altitude	3
	Azimuth	3

이중 블라인드 집광부 길이는 가로세로 각각 70 cm에 전체면적은 0.98 m²이고, 블라인드 날개의 길이는 모두 5 cm이다. 표 1은 집광장치의 설계 사양을 보여주고 있다. 이중 블라인드 집광부에 설치된 추적장치는 태양 빛을 보다 효과적으로 수집하여 주광 조명시스템의 효율을 향상시키기 위하여 구비하였다. 추적용 모터는 블라인드 프레임에 고정되어 있으며, 이중으로 되어 있는 블라인드의 각도를 변화시킴으로써 태양의 고도각과 방위각을 추적하도록 설계하였다. 추적 방식은 태양의 시간별 위치를 프로그램화하여 실시간으로 추적하도록 하였으며, 이중 블라인드 각각에 스텝모터를 설치하여 구동시킴으로써 블라인드 각을 변화시켰다. 스텝모터는 100W급으로 GPS 모듈의 시간을 기준으로 현재 태양각을 추적할 수 있는 오차범위는 0.02도이며, 축감속비는 100:1이다.

2.2 DBLP 전송부

DBLP 전송부는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 1st 반사거울과 2nd 반사거울로 구성되며 2개의 반사거울 사이에는 사각뿔 기둥의 전송덕트를 구비하였다. 집광부로부터 유입된 태양 빛은 1st 반사거울에서 반사되어 사각뿔 기둥의 전송덕트를 통해 2nd 반사거울에서 재반사되어 산광부로 유입되게 된다.

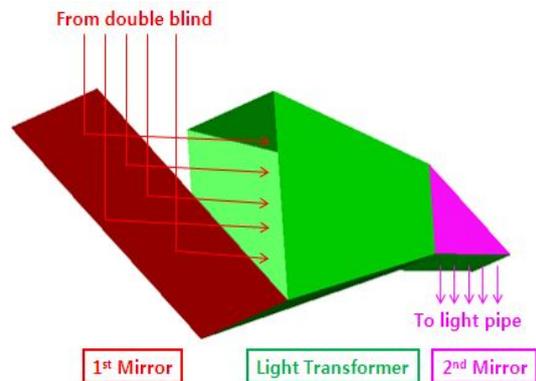


Fig. 3 Reflect mirror light transformer.

전송덕트의 내부 표면에는 99.5%의 반사 필름으로 구성되어 있으며, 입구부 크기는 70 cm × 70 cm, 출구부 크기는 30 cm × 30 cm로 설계 제작 하였다. 표 2는 전송부 설계 사양을 보여주고 있다.

Table. 2 Light transformer parameters

Shape	Quadrangular
Length [cm]	70
Entrance size [cm]	70×70
Exit size [cm]	30×30
Surface reflectance [%]	99.5

2.3 DBLP 산광부

산광부는 집광부로부터 유입된 태양 빛을 실내 조명에 활용할 수 있도록 뿌려주는 역할을 한다. 산광부는 사각형의 광파이프로 입구부는 30 cm × 60 cm, 길이는 380 cm로 설계 하였다. 광파이프의 내부에는 Fig. 4와 같이 바닥면에는 확산필름이 놓여 있고, 그 위에 다시 90°의 OLF(Optical lighting film) 필름이 놓여 있다. 광파이프 양 측면과 윗면에는 99.5%의 반사 필름이 붙여져 있으며, 윗면에는 반사필름 바로 아래에 빛을 추출하기 위한 추출필름이 놓여 있다. 90° OLF 필름은 광파이프로 유입되는 빛의 입사각이 27.6° 이내일 경우에서 유입된 빛을 99% 반사시키고, 27.6° 보다 높은 각에서는 유입된 빛을 굴절시켜 투과시키는 특성이 있다. 추출 필름은 빛을 산란 반사시켜 27.6°이내의 빛을 27.6° 보다 높게 바꿔주는 기능을 한다. 추출 필름은 입구부에서 광파이프 끝으로 갈수록 폭이 증가하는데, 이는 광파이프에서 산광되는 빛이 실내에 균등하게 분배시키기 위함이다. 광파이프 끝에는 5°의 경사를 갖는 반사거울을 구비하여, 광파이프 끝에 직접적으로 도달하는 빛을 5°의 경사로 반사시킴으로써 빛이 재반사되어 광파이프 밖으로 나가는 것을 방지하였다. 표 3은 산광장치 설계 사양을 보여주고 있다.

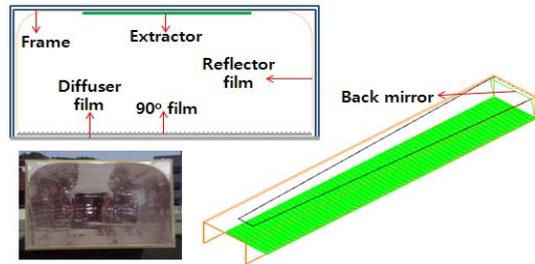


Fig. 4 Light pipe distributor.

Table. 3 Light pipe distributor parameters

Size [cm]		60×30×380
Frame material		Aluminum
Interior film	Upper	Reflect+Extractor
	Sides	Reflect
	Bottom	OLF+Diffuser
	Back	Reflect

3. 시스템 효율 평가

3.1 광속법에 의한 효율 계산법⁶⁾

광속법은 주광시스템의 특성으로써 집광채광기에 입사된 총광속(lm; lumens) 대비 산광장치에서 방사되는 총광속의 비로 나타냈다. 이에 따르면, 일반적으로 주광 시스템의 효율(η_t)은 집광면에 입사되는 광속(Φ_i)_C에 대하여 산광부로 방사되는 광속(Φ_o)_D의 비율로 정의되며 식 (1)로 표시된다. 또한 식 (1)은 시스템을 구성하는 집광부(η_c), 전송부(η_T), 산광부(η_D) 각각에서의 효율의 곱으로 표현할 수 있으며, 세부적으로는 식 (3)과 같이 풀어서 구할 수 있다.

$$\eta_t = \frac{(\Phi_o)_D}{(\Phi_i)_C} \tag{1}$$

$$\eta_t = \eta_c \times \eta_T \times \eta_D \tag{2}$$

6) 에너지관리공단 “신에너지및재생에너지개발이용보급촉진법” 시행규칙 제7조 제1항의 설비인증심사기준인 NR PV 601:2007 “신재생에너지 설비심사세부기준-태양광집광채광기 6.16 집광효율시험”에 근거함.

$$\eta_t = \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_C \times \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_T \times \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_D \quad (3)$$

식 (1)과 (3)에서 $(\Phi_i)_C$ 는 태양으로부터 집광부로 도달하는 태양빛의 전체 광속(lm; lumens)을 나타내고 있다. 집광부에서 나가는 태양빛의 광속 $(\Phi_o)_C$ 은 전송부로 들어가는 태양빛의 광속 $(\Phi_i)_T$ 과 같고, 전송부에서 나오는 태양빛의 광속 $(\Phi_o)_T$ 은 산광부로 들어가는 태양빛의 광속 $(\Phi_i)_D$ 과 같다. 결과적으로 산광부에서 실내로 보내지는 태양빛의 광속 $(\Phi_o)_D$ 이 실내조명에 활용된다.

3.2 실증 시스템 성능 평가 방법

이중 블라인드 광파이프 주광 조명시스템은 대전에 위치한 한국에너지기술연구원내의 실험용 건물을 대상으로 Fig. 5와 같이 적용하였다. 실험용 건물은 벽체는 샌드위치 판넬로 구성되어 있고, 내부에 창은 없으며, 실내 공간은 2.0m×2.4m×3.8m이다.



Fig. 5 DBLP system test building.

실험은 2012년 1월 30일부터 2월 27일 중 청천공 및 부분 담천공일 때에 수행하였으며, 오전 10:00부터 오후 16:00까지 실험데이터를 확보하였다. 데이터는 2분 간격으로 측정하여 30분 단위로 평균을 구하여 시스템 효율을 구하였다. 이중 블라인드 광파이프 주광 조명시스템의 집광부는 정남향 방향으로 설치하였고, 산광장치는 투과율 50%의 확산 필름을 사용하였다. 또한 Fig. 6과 같이 집광장치와 평행하게 조도계를 설치하여 집광부에 입사되는 정남향 조도를 측정하고 산광장치에서 방사되는 광속을 측정하기 위하여 산광장치

바로 아래를 7개 구역으로 나눠서 각 구역의 평균 방사 조도를 측정하였다. 실험용 조도계는 0.01~299,900 lx까지 측정이 가능하고 측정오차가 2% 이내인 T-10 조도계를 사용하였고, 자체 모니터링 프로그램인 T-30을 사용하여 조도측정 데이터를 획득하였다. 표 4는 실험기간 동안의 DBLP 시스템에서의 시간별 입사 전체평균 조도와 방사 전체평균 조도를 나타내고 있다.



Fig. 6 Illuminance sensors.

Table. 4 DBLP system timely average lux data

Time	Input lux [lux]	Output lux [lux]
10:00	55,319	2,454
10:30	64,841	2,314
11:00	67,478	1,769
11:30	68,360	1,928
12:00	76,453	3,596
12:30	78,265	5,577
13:00	81,423	6,376
13:30	81,225	5,098
14:00	76,109	3,506
14:30	71,991	3,100
15:00	64,348	3,303
15:30	55,477	3,156
16:00	41,486	2,119
평균	67,906	3,408

3.3 DBLP 시스템 효율 평가 결과

실험 기간 동안에 측정된 조도 데이터를 활용하여 표 5와 같이 시간별 평균 집광장치 입사광속과 산광장치 방사광속, 그리고 시스템 효율을 도출하였다. 입사광속은 집광부 유입면적과 평균 입사조도와의 곱으로 구할 수 있으며, 방사광속은 산광부 유출면적과 평균 방사조도의 곱으로 구할 수 있다. 집광부 평균 입사광속은 66,548 lm (67,906 lux × 0.98 m²)

이며, 산광부 평균 방사광속은 7,769 lm (3,408 lum × 2.28 m²)으로 나타났으며, 실험기간 동안의 DBLP 시스템에 일일 평균 효율은 11.67%로 나타났다. Fig. 7은 실험기간 동안의 시간대별 평균 시스템 효율 그래프를 보여주고 있다. 그래프에서 오전 11:00에서 12:00 사이와 14:00에서 15:00 사이에 시스템 효율이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이러한 이유는 이 시간에서 태양빛은 블라인드에 반사되어 전송부로 유입되는 양보다 블라인드와 블라인드 사이를 통과해버리는 양이 더 많기 때문이었다.⁷⁾

Table. 5 DBLP system timely average efficiency

Time	Input lumens [lm]	Output lumens [lm]	Efficiency [%]
10:00	54,213	5,596	10.32
10:30	63,544	5,276	8.30
11:00	66,128	4,034	6.10
11:30	66,993	4,395	6.56
12:00	74,924	8,198	10.94
12:30	76,699	12,717	16.58
13:00	79,795	14,538	18.22
13:30	79,601	11,623	14.60
14:00	74,586	7,995	10.72
14:30	70,551	7,068	10.02
15:00	63,061	7,532	11.94
15:30	54,368	7,196	13.24
16:00	40,656	4,832	11.89
Average	66,548	7,769	11.67

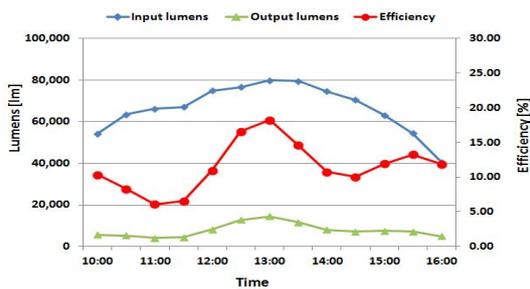


Fig. 7 DBLP system timely efficiency variation.

7) 대한설비공학회에 게재된 “Tracepro를 활용한 이중 블라인드 광파이프 채광 시스템의 블라인드 설계 및 시스템 효율 평가” 논문에서 시뮬레이션을 통하여 태양 방위각이 20° 내외인 경우에 이러한 결과를 얻을 수 있다는 것을 설명하였음.

Table. 6 DBLP system efficiency comparison result.

Solar position		theoretic efficiency	actual efficiency	Error [%]
12:30	Altitude 45°	19.6	16.6	15.3
	Azimuth 181°			
14:30	Altitude 39°	11.3	10.0	11.5
	Azimuth 220°			

표 6은 시뮬레이션에 의한 DBLP 시스템의 이론적 효율⁸⁾과 실측에 의한 실험적 효율 결과이며, 태양의 남중시간과 오후시간을 기준으로 비교 하였다. 시스템의 이론적 효율에 비해 실험적 효율이 전반적으로 낮게 나타나는 이유는 시스템 설치시 발생하는 손실과 태양의 직달광이 아닌 산란광에 의해 빛이 산광부까지 전달하지 못함으로 발생하는 손실, 반사필름 표면에 먼지나 오염물질에 의한 손실 등이 있을 것이며, 이러한 손실을 줄이기 위해서는 설계도면을 최대한 반영하여 시스템을 구축하고, 시스템에 오염물질이 유입되지 않도록 커버를 씌우도록 해야 한다.

3.4 DBLP 시스템 조명에너지 저감량 평가

DBLP 시스템의 조명에너지 저감량은 기준에 사용되는 인공광원의 조명에너지 소비량을 얼마나 대체할 수 있는가로 평가할 수 있다. 조명에너지 생산량 비교를 위하여 일반 건물에 주로 사용되는 콤팩트형광램프의 광변환 평균효율을 기준으로 하였으며, 그 값은 56.7 lm/W⁹⁾이다. 실험기간 동안의 DBLP 시스템에서 생산한 일일 평균 조명에너지는 7,769 lm이며 총 6 시간동안 생산하였다. 따라서 DBLP 시스템의 일일 평균 조명에너지 저감량은 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

8) 대한설비공학회에 게재된 “Tracepro를 활용한 이중 블라인드 광파이프 채광 시스템의 블라인드 설계 및 시스템 효율 평가” 논문에서는 대전 지역의 태양 고도와 방위각에 따른 계절별 DBLP 시스템의 효율을 이론적으로 분석하였으며, 년 평균 10% 이상의 시스템 효율이 나타남을 검토하였음.

9) 한국건설기술연구원, “집광채광 설비에 대한 단위에너지생산량 산출” 공청회 발표자료(2012.02.28)에서 제시한 조명기기 효율, p.2

조명에너지 저감량(kWh/day) = 일일 조명 에너지 생산량(lm) × 이용시간(h/day) ÷ 환산계수(lm/W) (4)

식 (4)에 의하여 계산된 DBLP 시스템의 일일평균 조명에너지 저감량은 0.822 kWh/day 이며, 이 값은 32W 형광등 4대를 6.4시간 동안 사용하는 만큼의 조명 에너지에 해당되는 것을 나타냈다.

5. 결 론

본 논문에서는 이중 블라인드 집광장치와 덕트형 광 전송장치, 그리고 광파이프 산광장치로 구성된 주광 조명시스템을 설계 제작하여 실증 실험을 통한 시스템 효율을 이론적 시스템 효율과 비교 평가하였으며, 인공 광원 대비 DBLP 시스템의 조명에너지 저감량을 평가하였다. 본 연구를 통한 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 이중 블라인드 집광장치와 덕트형 광 전송장치, 그리고 광파이프 산광장치로 구성되는 주광 조명시스템을 설계 구현하였다.
- (2) 한국에너지기술연구원 내의 실험용 건물을 대상으로 이중 블라인드 광파이프 주광 조명 장치를 적용하였고 시스템의 효율을 평가하였다.
- (3) 이중 블라인드 광파이프 주광 조명시스템의 효율을 평가한 결과 실험기간 동안 일일 평균 효율은 11.67%로 나타났다.
- (4) DBLP 시스템의 실측 효율을 이론적 효율과 비교해본 결과 약 최대 15.3% 정도 이론적 효율이 높게 나타났으며, 이는 시스템 구현상에 발생하는 손실과 태양의 산란광 영향에 의한 손실이라 판단된다.
- (5) DBLP 시스템의 일일평균 조명에너지 저감량을 평가한 결과 32W급 형광등 4대를 6.4시간 사용하는 만큼의 조명에너지 저감효과를 기대할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(과제번호 : 2009T100100950)입니다.

참 고 문 헌

1. Kang, E. C. et al., Tracepro Simulation Design and Evaluation for the Double Blind Light Pipe Daylighting System, Journal of SAREK, Vol. 24, No. 6, 2012.
2. Kang, E. C. et al., Circular Fresnel POF(Plastic Optical Fiber) Daylighting System Performance Evaluation Study, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 31, No. 1, 2011.
3. Choi, Y. J., Kang, E. C. and Lee, E. J., Performance Comparison Study on LFLP and DBLP Daylighting System, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, Vol. 35, No. 8, 2011.
4. Alvin, W. et al., Development of New Solar Collection System for Light Pipe Technology, Proceedings of the KSES 2004 Spring Annual Conference, 2004.
5. Lee, E. J., Light Concentration and Light Pipe Daylighting System Technologies, The Magazine of Korean Solar Energy Society, Vol.7, No.1, 2008.
6. Lambda Research Corporation, TracePro User's manual Release 3.0, 2002.
7. KEMCO, Standards for New & Renewable Energy Facility-Daylight System, PV 601:2007., 2007.