

# Tracepro를 활용한 이중 블라인드 광파이프 채광 시스템의 블라인드 설계 및 시스템 효율 평가

강 은 철<sup>†</sup>, 이 의 준, 유 성 연<sup>\*</sup>  
한국에너지기술연구원, \*충남대학교 기계설계공학과

## Tracepro Simulation Design and Evaluation for the Double Blind Light Pipe Daylighting System

Eun-Chul Kang<sup>†</sup>, Euy-Joon Lee, Seong-Yeon Yo<sup>\*</sup>

Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

<sup>\*</sup>Department of Mechanical Design, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received March 19, 2012; revision received May 8, 2012)

**ABSTRACT:** A daylighting system includes three parts; light collector, light transformer and light distributor. A DBLP(Double blind light pipe) daylighting system consists of a double blind light collector, a mirror duct type light transformer and a prism film light pipe distributor. The double blinds for a light collection are used to track the sun's altitude and azimuth movements throughout the day. Behind both sets of blinds is the light transformer, which is based on a rectangular cone shaped light duct. The light transformer was designed to efficiently deliver the light into the light pipe within a 30 degree radial spread for the efficient light into the distributor. In this study, DBLP system efficiency was simulated, evaluated and optimized by Tracepro as a popular ray trace light design simulation program. The results indicated that DBLP system efficiency evaluated a maximum 22.4% in case of Spring/Fall season solar noon time. While the overall average system efficiency in the morning and afternoon is evaluated about 10%.

**Key words:** Double blind(이중블라인드), Light pipe(광파이프), Daylighting(채광), Light collector(집광부), Light transformer(전송부), Light distributor(산광부)

### 기 호 설 명

$\eta$  : 광전송 효율 [%]  
 $\phi$  : 광속 [Lumens]  
 $A$  : 면적 [ $m^2$ ]

$T$  : 전송부(Transformer)  
 $D$  : 산광부(Distributor)  
 $i$  : 입구부(input)  
 $o$  : 출구부(output)

### 하첨자

$C$  : 집광부(Collector)

### 1. 서 론

최근 실내 재실자들의 작업환경 개선책으로 기존 인공광보다는 자연 채광에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 채광은 조명기능 이외에 살균, 소독, 정화, 생육 등의 기능을 포함하고 있으며, 재실자는 안정된 분위기 속에서 생활함으로써 우울증을 비롯한 각종

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-860-3511; fax: +82-42-860-3739

E-mail address: kec8008@kier.re.kr

질병을 예방할 수 있다. 또한 채광을 실내조명에 활용함으로써 조명에 사용되는 전력부하를 낮출 수 있으므로 전력요금 절감 효과를 기대할 수 있고, 기존 인공조명의 수명을 연장시킬 수 있다. 이러한 채광 조명기술은 영국, 캐나다, 일본 등 선진국을 중심으로 연구되고 있으며, 국내에서는 2000년도 이후 고정형을 비롯한 태양 추적형의 채광 조명 기술이 소개되고 있다.<sup>(1-3)</sup>

채광 기술에 대한 기존 연구로는 Kang의 원형 프레넬 집광형 POF 추적식 채광 시스템<sup>(1)</sup>과 Choi의 선형 프레넬 필름을 활용한 채광 조명 기술<sup>(2)</sup> 등이 소개되었으며, POF 채광 시스템은 고집광형으로 자연채광 고유의 특성을 유지하기 어렵고, 선형 프레넬 채광 조명기술은 시스템 효율이 5% 내외로 낮게 나타나고 있다. Alvin는 이중 블라인드 채광 조명 기술에 대한 기초 연구<sup>(3)</sup>를 수행하였으나, 연구 단계에 머물고 있다.

본 연구에서는 기존 채광 조명의 현안인 태양빛의 고유 특성을 보존할 수 있고, 실제 건물 적용에 가능한 채광 조명 기술 도입을 목표로 광학 해석 프로그램인 TracePro를 이용하여 이중 블라인드 형식의 집광장치와 덕트형식의 광 전송장치, 그리고 전송된 빛을 실내로 뿌려주는 산광장치로 구성된 이중 블라인드 광파이프 채광 시스템을 설계하여 적용 가능성을 평가해보고자 한다.

## 2. 이중 블라인드 광파이프 채광 시스템

이중 블라인드 광파이프(DBLP; Double blind light pipe)<sup>(2-4)</sup> 채광 시스템은 태양빛의 고도(상하 추적)와 방위각(좌우 추적)을 추적하는 이중 블라인드 형태의 집광부와 집광된 빛의 손실을 최소화하여 산광부로 전송하는 광 전송부, 그리고 전송된 빛을 실내로 분배해주는 산광부로 구성된다. Fig. 1은 이중 블

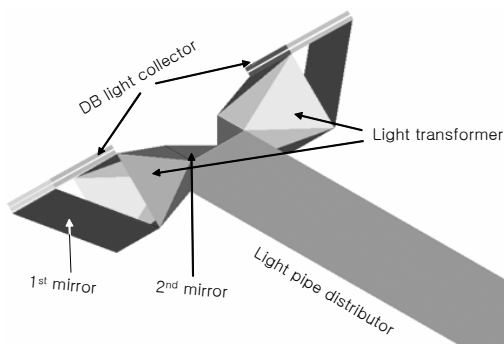


Fig. 1 DBLP daylighting system.

라인드 광파이프 채광 시스템의 전체 구성도를 보여주고 있으며, 시스템의 각 요소별 세부 설계 내용은 다음과 같다.

### 2.1 집광부

집광부는 태양을 추적하는 추적장치와 빛을 전송부로 보내주기 위한 이중 블라인드(DB; Double blind) 형태의 집광 장치로 구성된다. 태양의 고도를 추적하는 고도추적용 블라인드는 상하로 구동되어 태양 고도에 상관없이 빛을 산광부에 수직으로 보내주기 위한 장치이며, 방위각 추적용 블라인드는 좌우로 구동되어 태양방위각에 상관없이 빛을 산광부에 수직으로 보내주기 위한 장치이다. 이중 블라인드 집광부 길이는 가로세로 각각 70 cm에 전체면적은 0.98 m<sup>2</sup> 이고, 블라인드 날개의 길이는 모두 5 cm이다. Fig. 2는 각각의 블라인드 치수 및 이중 블라인드 집광 장치의 도면을 보여주고 있다.

### 2.2 전송부

전송부는 전송용 덕트와 2개의 전반사 거울을 이용하여 설계하였으며, Fig. 3은 전송부의 설계도면을 보여주고 있다. 이러한 형태는 집광된 빛이 전송부에 정확하게 수직으로 유입되지 않더라도 빛 손실을 최소화하여 산광부로 빛을 전송할 수 있는 장점이 있다. 이중 블라인드에서 유입된 빛은 첫 번째 거울에서 반사되어 전송덕트를 통해 두 번째 거울에서 다시 반사되어 산광부로 유입된다.

전송덕트는 팔각기둥의 형태로 길이는 70 cm이며, 입구부는 70 cm×70 cm, 출구부는 30 cm×30 cm로 설계하였다. 또한 첫 번째 거울은 태양빛을 잘 유입할 수 있도록 고도각 45°로의 설계하고, 덕트를 통과한 후 도달하는 두 번째 거울은 건물에 수직으로 유입될 수 있도록 설계하였다.

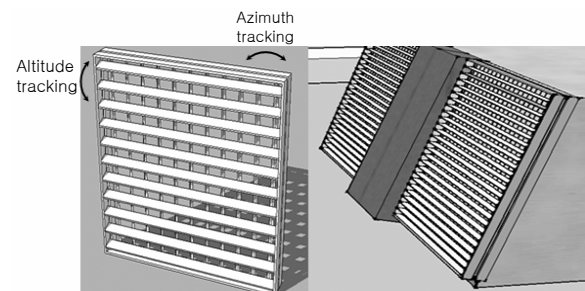


Fig. 2 Double blind light collector.

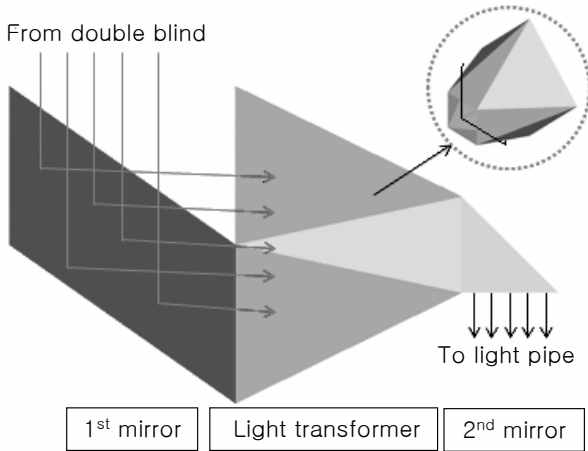


Fig. 3 Mirror type light transformer.

### 2.3 산광부

산광부는 직사각형 광파이프(LP; Light pipe) 형태로 입구 크기는 30 cm×60 cm, 길이는 400 cm로 설계하였다. 광파이프의 내부에는 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 전반사 필름, 90°의 OLF(Optical lighting film) 필름, 추출 필름, 확산 필름으로 구성된다. 90° OLF 필름은 광파이프로 유입되는 빛의 입사각이 27.6°이내에서는 99% 반사시키고, 27.6° 이상에서는 투과시키는 특성이 있다. 추출 필름은 빛을 산란 반사시켜 27.6°이내의 빛을 27.6° 이상으로 바꿔주는 기능을 한다. 추출 필름은 입구부에서 광파이프 끝으로 갈수록 넓이가 증가하도록 설계하였는데, 이는 광파이프에서 산광되는 빛이 실내로 균등하게 분배되도록 하기 위함이다. 광파이프 끝에는 5°의 경사를 갖는 반사거울을 구비하여, 광파이프 끝에 직접적으로 도달하는 빛을 5°의 경사로 반사시킴으로써 빛이 재반사되어 나가는 것을 방지하고 실내에 활용될 수 있도록 하였다.

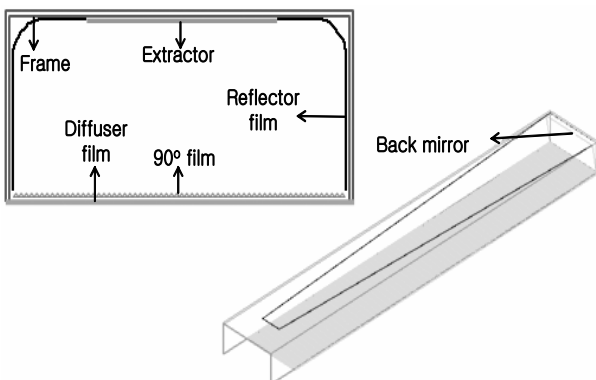


Fig. 4 Light pipe distributor.

Table 1 Tracepro simulation parameters

Surface film (Application)	Parameter	Value
Reflector film (Collector, Transformer, Pipe)	$\gamma$	0.995
	$\tau$	0.5
	$\alpha$ , BRDF, BTDF	0
Extractor film (Light pipe)	$\gamma$	0.8
	BRDF	0.2
	$\alpha$ , $\tau$ , BTDF	0
Diffuser film (Light pipe)	$\gamma$	0.3
	BTDF	0.7
	$\alpha$ , $\tau$ , BRDF	0

### 2.4 Tracepro 시뮬레이션

Tracepro는 솔리드 모델에 의해 빛이 전파될 때의 빛 플럭스를 광학적으로 분석해 주는 광학 해석 프로그램이다. 이 프로그램에서는 물체에서 발생하는 빛의 흡수, 전반사, 굴절, 회절, 산란을 계산하기 때문에 실험에 적용되는 물체에 대한 빛의 흡수율( $\alpha$ ), 반사율( $\gamma$ ), 굴절율( $\tau$ ), 산란율(BRDF; Bi-directional reflectance distribution function), 회절율(BTDF; Bi-directional transmittance distribution function)을 알고 있으면, 실험을 통한 결과와 유사한 시뮬레이션을 수행할 수 있다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서 적용된 집광부, 전송부, 산광부의 시뮬레이션 입력데이터는 Table 1에 정리하였다. 집광부(Collector)와 전송부(Transformer)는 전반사 필름(Reflector film)으로만 구성되어 있으며, 산광부는 전반사 필름과 추출(Extractor) 필름, 확산(Diffuser) 필름으로 구성된다.

$$\alpha + \gamma + \tau + \text{BRDF} + \text{BTDF} = 1 \quad (1)$$

## 3. 시스템 효율 분석

### 3.1 광속법에 의한 효율 계산법<sup>(1)</sup>

태양광을 이용한 채광 시스템의 효율( $\eta$ )은 집광부( $\eta_C$ ), 전송부( $\eta_T$ ), 산광부( $\eta_D$ )에서 각각의 효율을 구함으로써 얻어질 수 있으며 식(2), 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

식(1)과 식(2)에서  $(\Phi)_C$ 는 태양에서 집광부로 도달하는 전체광속(Total lumens)을 나타내고 있다. 집광부에서 나가는 광속( $\Phi_o$ )<sub>C</sub>은 전송부로 들어가는 광속( $\Phi_i$ )<sub>T</sub>과 같고, 전송부에서 나오는 광속( $\Phi_o$ )<sub>T</sub>은 산광부로 들어가는 광속( $\Phi_i$ )<sub>D</sub>과 같다. 최종적으로는 산광부에서 실내로 보내는 광속( $\Phi_o$ )<sub>D</sub>이 실내조명에 활용된다. 따라서 본 시스템의 전체 효율 관계식은 집광부에 도달한 광속( $\Phi_i$ )<sub>C</sub> 중 산광부를 통해 실내 조명에 활용되는 광속( $\Phi_o$ )<sub>D</sub>의 비<sup>(6)</sup>로 구할 수 있으며, 식(4)와 같다.

$$\eta = \frac{(\Phi_o)_D}{(\Phi_i)_C} \tag{4}$$

### 3.2 집광-전송 효율

이중 블라인드 광파이프(DBLP) 채광 시스템의 효율을 구하기 위하여 집광부와 전송부를 통합하였으며, 블라인드 날개 간격 변화에 따른 집광-전송 효율을 평가하였다. 집광-전송 효율은 광 해석 프로그램인 Tracepro ver. 3.0에서 수행하였다. 블라인드 날개의 사이 간격은 3 cm, 4 cm, 5 cm에 대하여 평가하였으며, 블라인드가 없는 경우와 비교하여 분석하였다. 블라인드 각은 수평면으로부터 45° 기울어서 설치하여 태양빛을 잘 받을 수 있도록 하였으며, 태양을 기준으로 고도각은 10°에서 80°까지 5°

Table 2 Collector-transformer efficiency value according to the blind altitude angle

Altitude[°]	No DBLP		3 cm	4 cm	5 cm
	Solar	DBLP			
10	-35	1.8	32.5	30.6	21.2
15	-30	2.1	25.4	22.6	16.8
20	-25	6.9	27.6	23.5	16.6
25	-20	16.8	30.2	27.7	25.5
30	-15	31.7	37.8	35.4	34.7
35	-10	47.6	46.7	46.5	46.9
40	-5	55.4	54.7	54.0	54.1
45	0	68.3	64.3	64.3	65.4
50	5	65.1	59.0	63.3	61.1
55	10	52.8	49.1	53.3	51.3
60	15	35.3	39.7	41.8	39.2
65	20	17.1	29.5	27.5	22.2
70	25	8.0	25.2	20.9	18.4
75	30	2.7	28.7	19.4	18.0
80	35	2.2	32.6	25.7	19.3

간격으로 바뀌가며 분석하였다. Fig. 5는 블라인드 고도각에 따른 효율 변화를 나타내고 있으며, 그 값들은 Table 2에 정리하였다. DBLP가 없는 경우를 살펴보면 태양고도 45°에서 68.3%의 가장 높은 효율을 보이고 있지만, 45°에서 멀어질수록 효율은 급격하게 떨어져서 3% 이하까지 낮아지는 것을 알 수 있었다. 반면에 이중 블라인드가 있는 경우에는 태양고도 45°에서는 DBLP가 없는 경우에 비해 효율이 다소 낮게 나타났지만, 효율이 가장 낮게 나타나는 고도각 75°에서도 평균 20% 이상의 효율을 보여주고 있다. 특히 블라인드 사이 간격이 3 cm인 경우에는 최소 25% 이상의 효율을 보여주고 있음을 알 수 있었다.

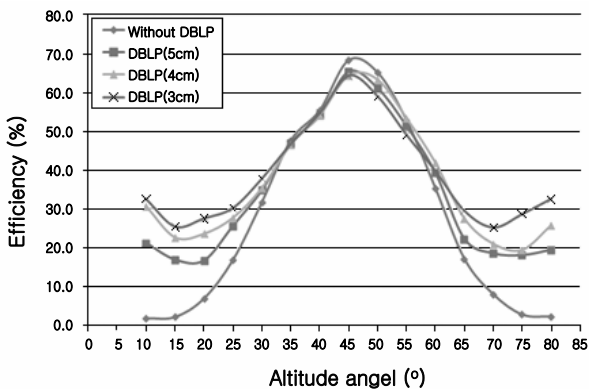


Fig. 5 Collector-transformer efficiency grape according to the blind altitude angle.

Fig. 6은 블라인드 방위각에 따른 효율변화 그래프를 보여주고 있으며, 그 값들은 Table 3에 정리하였다. 방위각은 정남향을 0°로 하여 0°에서 60°까지 5° 간격으로 바뀌가며 분석하였다. DBLP가 없는 경우에는 정남향에서 약 70%의 효율을 보이고 있으나, 방위각이 정남향에서 멀어질수록 효율은 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 그러나 이중 블라인드가 있는 경우에는 정남향에서 약 65%의 효율을 보이고 있지만, 방위각이 0°에서 20°까지는 효율이 감소하다가 20° 이후부터는 조금씩 증가하는 결

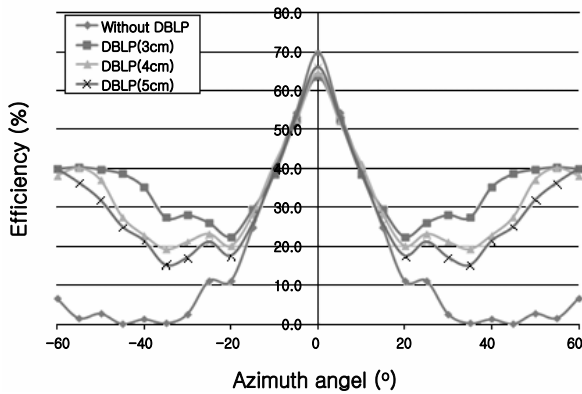


Fig. 6 Collector-transformer efficiency graph according to the blind azimuth angle.

Table 3 Collector-transformer efficiency value according to the blind azimuth angle

Azimuth [°]	No DBLP	3 cm	4 cm	5 cm
0	69.7	63.4	64.5	66.1
5	54.3	52.6	52.1	53.1
10	39.8	38.5	41.1	38.7
15	24.7	29.4	28.1	25.8
20	11.0	22.4	20.0	17.5
25	11.1	26.0	23.1	21.1
30	2.5	28.0	21.1	17.1
35	0.1	27.3	19.2	15.1
40	1.2	35.2	22.8	21.3
45	0.0	38.5	27.5	25.0
50	2.6	39.7	37.0	31.8
55	1.5	40.3	40.1	36.3
60	6.5	39.8	38.1	39.9

과를 볼 수 있다. 이와 같이 효율이 60°가 아닌 20°~35°에서 최소의 효율을 보이는 이유는 이 범위에서 태양빛은 블라인드에 반사되어 전송부로 유입되는 양보다 블라인드 사이를 통과해버리는 양이 많기 때문이다. 효율이 가장 낮은 방위각 20°에서도 최소 효율은 약 20%를 보이고 있다.

### 3.3 광파이프 효율

광파이프의 산광효율은 유입되는 빛의 각도, 길이 변화에 따른 손실, 확산필름의 효율 등에 따라 다르게 나타난다. 본 고에서는 이중 블라인드 효율이 가장 높은 태양고도 45°, 방위각 0°에서 광파이프

효율을 분석하였으며, 그 결과 광파이프의 효율은 약 60%로 나타났다.

### 3.4 DBLP 시스템 효율 평가

DBLP 시스템 효율 평가를 위하여 고도각과 방위각 블라인드의 집광-전송 효율이 가장 높게 나타나는 블라인드 날개 간격이 3 cm일 경우에 대하여 분석하였다. Table 4는 DBLP 시스템의 효율을 평가하기 위한 시스템 구성 요소별 사양을 나타내고 있다. 시스템 효율은 Tracepro 광해석 프로그램을 활용하여 대전지역에서의 동계, 하계, 춘추계 기간에 대하여 낮 12:30(정오)과 오후 시간을 대표하는 15:00에서의 고도각과 방위각을 5° 간격으로 수렴시켜서 평가하였다. 계산식은 식(2)을 이용하였으며, 집광-전송효율( $\eta_C \times \eta_T$ )과 광파이프 효율( $\eta_D$ )의 곱으로 표시하였다.

Table 4 Integrated DBLP system parameters

DBLP system parameters		
DB Light Collector	Diameter[cm]	70×70
	Total area[m <sup>2</sup> ]	0.98
	Blind length[cm]	5
	Blind gap	Altitude[cm] Azimuth[cm]
Light Transformer	Length[cm]	70
	Entrance[cm]	70×70
	Exit[cm]	30×30
	Gradient[°]	45
Light Pipe Distributor	Entrance[cm]	30×60
	Length[cm]	400
	Efficiency[%]	60

Table 5 DBLP system seasonal efficiency

Season		Altitude[°]		Azimuth [°]	System Efficiency
		Solar	DBLP		
Winter	12 : 30	30°	-15°	0°	14.4
	15 : 00	20°	-25°	40°	5.8
Summer	12 : 30	75°	30°	0°	10.9
	15 : 00	55°	10°	60°	11.7
Spring/ Fall	12 : 30	50°	5°	0°	22.4
	15 : 00	40°	-5°	50°	13.0

Table 5는 계절별 DBLP 시스템의 효율을 보여주고 있으며, 동계 오후 시간을 제외하고는 계절 전반에 걸쳐 10% 이상의 시스템 효율이 나타났다. 특히 춘추계 정오 시간에서 시스템 효율이 22.4%로 가장 높게 나타났으며, 동계 오후 시간에서는 5.8%로 가장 낮게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 이중 블라인드형 집광장치와 덕트형 광 전송장치 및 광파이프 산광장치로 구성된 채광 기술을 소개하고 광학 해석 프로그램인 Tracepro를 활용하여 본 시스템의 효율을 평가해 봄으로써 실제 적용 가능성을 검토해 보았다. 본 연구를 통한 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 이중 블라인드형 집광부와 덕트형 광 전송부, 그리고 광파이프 산광부로 구성되는 채광 기술을 소개하였다.

(2) DBLP 채광 시스템의 효율은 Tracepro를 활용하여 도출하였으며, 계산방법은 집광-전송 효율과 산광부 효율의 곱으로 나타내었다.

(3) 집광부 블라인드 날개의 길이가 5 cm인 경우에서 고도와 방위각 블라인드 사이 간격은 모두 3 cm일 경우 가장 높은 효율을 보였다.

(4) 대전지역 기준 DBLP 시스템의 효율은 춘추계 정오 시간에서 시스템 효율이 22.4%로 가장 높게 나타났으며, 동계 오후 시간에서는 5.8%로 가장 낮게 나타났다.

(5) 본 논문을 통해 제시한 DBLP 채광 기술은 일반 벽체 고정형 채광 기술 대비 오전 오후 시간에서도 평균 10% 이상의 시스템 효율을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

1. Kang, E. C. et al., 2011, Circular fresnel POF (plastic optical fiber) daylighting system performance evaluation study, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 31, No. 1, pp. 31-36.
2. Choi, Y. J., Kang, E. C., and Lee, E. J., 2011, Performance comparison study on LFLP and DBLP daylighting system, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B, Vol. 35, No. 8, pp. 799-804.
3. Alvin, W., Kang, E. C., and Lee, E. J., 2004, Development of new solar collection system for light pipe technology, Proceedings of the KSES Spring Annual Conference, pp. 117-124.
4. Lee, E. J., 2008, Light concentration and light pipe daylighting system technologies, The Magazine of Korean Solar Energy Society, Vol. 7, No. 1, pp. 14-19.
5. Lambda Research Corporation, 2002, TracePro User's manual Release 3.0, pp. 1-3.
6. KEMCO, 2007, Standards for New and Renewable Energy Facility-Daylight System, PV 601 : 2007.