

원형 프레넬 집광형 POF 주광 조명시스템 성능 평가 연구

강은철*, 최용전**, 윤광식***, 이의준****

*한국에너지기술연구원(kec8008@kier.re.kr), **충남대학교 대학원 건축공학과(yjchoi@kier.re.kr),
한국에이비엔건설(주)(yks5599@hanmail.net), *한국에너지기술연구원(ejlee@kier.re.kr)

Circular Fresnel POF(Plastic Optical Fiber) Daylighting System Performance Evaluation Study

kang, Eun-Chul* Choi, Yong-Jun** Yoon, Kwang-Sik*** Lee, Euy-Joon****

*Korea Institute of Energy Research(kec8008@kier.re.kr),
**Dept. of Architecture, Graduate School, Chungnam University(yjchoi@kier.re.kr),
***Hankook ABM Construction Co. Ltd(yks5599@hanmail.net),
****Korea Institute of Energy Research(ejlee@kier.re.kr)

Abstract

CF(Circular Fresnel) POF(Plastic Optical Fiber) daylighting system is a beam daylighting system utilizing solar direct beam radiation. In this study, a CF POF daylighting system has been introduced, developed and applied to KIER test buildings. The CF POF daylighting system consists of three parts: light collector, light transmitter and light diffuser. The light collector includes a Circular Fresnel lens focusing solar direct illuminance by sun tracking. The light transmitter contains the POF cable which has light transmission loss of 4.5% per meter. The light diffuser has about 80% diffuser efficiency.

This study aims to evaluate of POF daylighting system performance. At the results of a CF POF system performance evaluation, the theoretical CF POF system efficiency was 41.9% and the actual CF POF system efficiency at the KIER test building was 37.5%. The difference was due partly to the connecting efficiency.

Keywords : 플라스틱광섬유(Plastic Optical Fiber), 집광부(Light Collector), 전송부(Light transmitter), 산광부(Light diffuser), 프레넬렌즈(Fresnel lens)

기 호 설 명

		C	: 집광부
		T	: 전송부
η	: 광전송 효율 [%]	D	: 산광부
ϕ	: 광속 [Lumens]	i	: 입구부
A	: 면적 [m ²]	o	: 출구부

투고일자 : 2010년 12월 1일, 심사일자 : 2010년 12월 23일, 게재확정일자 : 2011년 2월 14일
교신저자 : 강은철(kec8008@kier.re.kr)

1. 서론

태양빛을 이용한 주광 조명기술은 주간 동안에 실내에서 사용되는 인공조명을 태양빛을 이용하여 대체하는 기술을 말한다. 주광을 실내조명에 활용함으로써 조명에 사용되는 전력부하를 낮출 수 있으므로 전력요금 절감 효과를 기대할 수 있고, 기존 인공조명의 수명을 연장시킬 수 있다.

이러한 주광 조명기술은 영국, 일본 등 선진국을 중심으로 연구개발 되어 오고 있으며, 국내에서는 2000년도 이후 고정형 광덕트 방식의 기술 개발을 시작으로, 최근에는 태양 추적방식이 소개되고 있다.

본 연구에서는 이러한 주광을 실용적으로 이용하기 위한 방안으로 원형 프레넬 렌즈를 이용한 집광장치와 플라스틱 광섬유(POF; Plastic optical fiber)를 활용한 광 전송장치, 그리고 전송된 빛을 실내로 뿌려주는 산광장치로 구성된 태양 집광형 CF POF 주광 조명 기술을 소개하고 실증 실험에 의한 본 시스템의 성능을 평가해보고자 한다.

2. POF 주광 조명시스템

주광 시스템은 태양빛을 집광하여 수집하는 집광부와 집광된 빛을 산광부로 전송하는 전송부, 전송된 빛을 실내로 분배해주는 산광부(또는 배광부)로 구성된다. CF POF 주광 조명시스템의 구성은 그림 1과 같으며 각 요소별 세부 내용은 다음과 같다.

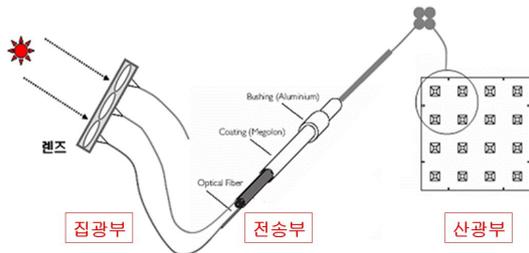


그림 1. CF POF 자연채광 시스템 구성 개요도

2.1 집광부

집광부는 집광장치 및 추적장치 보호를 위한 돔(Dome), 태양빛을 집광하는 원형 프레넬 렌즈, 태양 추적 센서, 태양 추적 구동장치로 구성되어 있다. 돔은 직경 1200mm, 두께 5mm인 반구형태의 PMMA 재질로 구성되어 있으며, 돔 내부에 위치한 프레넬 렌즈는 직경 60mm의 원형 구조로 평판형 집광판에 수평으로 설치되어 있다. 프레넬 렌즈는 총 62개가 설치되어 있으며 수광 면적은 약 0.1753m²이다.

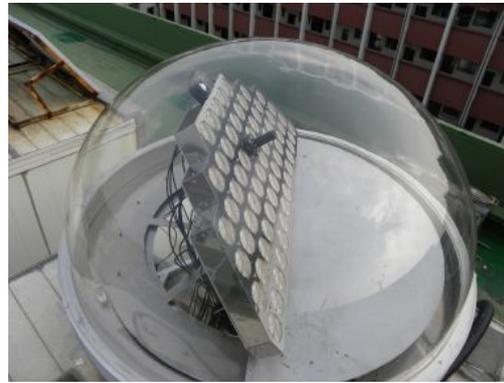


그림 2. CF POF 자연채광 시스템 집광부 전경

표 1. 집광부 구성 요소별 사양

Light collector		
Dome part	Diameter[mm]	∅1,200
	Material	PMMA
Fresnel lens	Diameter[mm]	∅60
	Focusing length[mm]	63
	Number of lens	62
	Total area[m ²]	0.1753
	Collection efficiency [%]	83
Control part	Sensing process	Volt. diffuser
	Maximum precision[°]	0.01
Driving part	Altitude angle[°]	17~80
	Azimuth angle[°]	0~270

태양 추적장치는 집광관 중앙에 설치된 광 센서에 의해 상하좌우 4방향으로 구동되며 최대 0.01°의 정밀도를 갖고 있다. 태양 추적 방식은 전동모터에 의하여 0°~270°의 방위 각 추적이 가능하며, 전동 실린더에 의하여 17°~80°의 고도각 추적이 가능하다. 소비전력은 가동 중에는 약 10W, 미가동 일때는 2W미만으로 매우 적다. 그림 2는 시스템 구현이 완료된 집광부의 전경을 보여주고 있으며, 구성 요소별 사양은 표 1과 같다.

2.2 전송부

본 시스템에서는 플라스틱 재질의 광섬유인 POF를 이용하여 전송부를 구현하였다. 실험에 사용되는 POF는 직경 2mm의 PMMA 재질로 만들어졌으며, 전송거리 1m당 약 4.5%의 광전송 손실이 발생한다. 실험에 사용되는 POF 길이는 10m이며, 전송거리에 따른 손실율이 약 36.9%임으로 전송부의 광전송 효율은 약 63.1%이다. 또한 태양광 집광에 의해 발생하는 열을 최소화하기 위하여 POF 입구부에 IR필터와 방열핀을 사용하였다. IR필터는 직경 11mm, 두께 0.5mm의 석영재질로 구성하였으며, 투과 파장대 350~650nm 범위에서 92~94%의 투과율을 보였다. 방열핀은 직경 12mm, 두께 15mm의 알루미늄 재질을 사용하였다.



그림 3. CF POF 자연채광 시스템 전송부 전경

표 2. 전송부 구성 요소별 사양

Light transmitter		
IR filter	Diameter[mm]	∅11
	Transmissivity[%]	92~94
POF	Diameter[mm]	∅2
	Material	PMMA
	Transmission loss[%/m]	4.5
	Transmission length[m]	10
	Transmission efficiency[%]	63.1

2.3 산광부

태양빛을 집광하여 POF에 의해 전달되는 빛은 산광부를 통하여 실내조명에 사용된다. 산광부는 POF를 고르게 배치시키기 위한 산광판과 현휘현상을 줄이면서 빛이 실내에 고르게 분포되도록 하기 위한 확산판으로 구성된다. 산광부의 크기는 600mm × 600mm × 120mm이며 산광면적은 0.36m²이다. 산광부에 사용된 산광판은 그림 4와 같이 총 62개의 POF를 직접 꽂을 수 있도록 구성하였으며, 확산판은 폴리스틸렌 재질로 약 80%의 투과율을 갖도록 제작하였다.



그림 4. CF POF 시스템 산광부 (좌:산광판, 우:확산판)

표 3. 전송부 구성 요소별 사양

Light diffuser	
Dimension[mm]	600×600×120
Material	Polystyrene
Diffuser area[m ²]	0.36
Diffuser efficiency[%]	80.0

3. 이론적 시스템 효율 분석

3.1 광속법에 의한 효율 계산법

태양광을 이용한 주광 조명시스템의 효율 (η_t)은 집광부(η_C), 전송부(η_T), 산광부(η_D)에서 각각의 효율을 곱함으로써 얻어질 수 있으며 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_t = \eta_C \times \eta_T \times \eta_D \quad (1)$$

$$\eta_t = \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_C \times \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_T \times \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_D \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 $(\Phi_i)_C$ 는 태양에서 집광부로 도달하는 전체광속(Total lumens)을 나타내고 있다. 집광부에서 나가는 광속(Φ_o)_C은 전송부로 들어가는 광속(Φ_i)_T과 같은 값이고, 전송부에서 나오는 광속(Φ_o)_T은 산광부로 들어가는 광속(Φ_i)_D과 같은 값이다. 최종적으로는 산광부에서 실내로 보내는 광속(Φ_o)_D이 실내조명에 활용된다. 따라서 본 시스템의 전체 효율 관계식은 집광부에 도달한 광속(Φ_i)_C 중 산광부를 통해 실내조명에 활용되는 광속(Φ_o)_D의 비로 구할 수 있으며, 식 (3)과 같다.

$$\eta = \frac{(\Phi_o)_D}{(\Phi_i)_C} \quad (3)$$

3.2 이론적 시스템 효율 계산

자연채광 시스템의 효율을 이론식 (1)에 의해 계산하면 시스템의 이론적 효율을 얻을 수 있다. 식 (1)에서 집광부 효율(η_C)은 프레넬 렌즈의 집광효율 83.0%로 볼 수 있으며, 전송부 효율(η_T)은 POF 10m에 대한 전송효율 63.1%, 산광부 효율(η_D)은 확산판의 투과율인 80.0%로 볼 수 있다. 따라서 각 구성요소의 효율을 통합하면 시스템의 이론적 효율은 약 41.9%가 된다. 이론적 효율은 이상적인 시스템이 구현되었을 때의 결과이며, 실제 시스템 효율은 이보다 낮게 나타난다.

4. CF POF 시스템 효율 측정

4.1 CF POF 시스템 실험 장치

시스템 성능 측정을 위해 한국에너지기술 연구원에 실험용 공간을 확보하여 CF POF 시스템을 설치하였다. 실험용 공간은 가로×세로×높이가 2.0m×3.6m×2.4m이며, 내부 표면에는 빛의 반사를 최소화하기 위하여 흑색 무광인 반사율 3%이내의 내장재로 마감 처리하였다. 실내외 조도 측정은 T-10 조도계를 사용하였고, 자체 모니터링 프로그램인 T-30을 사용하여 실시간으로 조도측정 데이터 획득이 가능하도록 구현하였다.



그림 5. CF POF 시스템 성능 평가 장치용 건물

표 4. 전송부 구성 요소별 사양

CF POF performance test room	
Material	Sandwich panel
Dimension[mm]	2,000×3,600×2,400
Volume[m ³]	17.3
Floor area[m ²]	7.2
Interior surface coating	Black paint coating

4.2 CF POF 시스템 실험 데이터

실증 실험은 기상조건이 청명한 상태인 2010년 10월 15일, 26일 양일에 걸쳐 오전 9시부터 오후 4시까지 30분 간격으로 CF POF 시스템의 성능 평가를 실시하였다. 실험 데이터는 외부 수평면조도와 법선면조도를 측정하고 같은 시간에 산광부 확산판에서 배출되는 조도를 측정하였다. 산광부 조도 측정은 확산판을 9개 구간으로 나눠서 각 구간의 평균조도를 보이는 곳(구간 중앙)에서의 조도를 측정하였다. 표 5는 실증 실험 기간에 측정한 일일 조도 평균 데이터를 보여주고 있으며, 표 6은 2010년 10월 15일 측정 시간별 일일 측정 데이터를 보여주고 있다.

표 5. CF POF 시스템 일별 평균 조도

Date	Horizontal average illuminance [Lux]	Direct average illuminance [Lux]	Output average illuminance [Lux]
10/15	63,693	104,253	19,485
10/26	60,176	100,953	17,419
Average	61,935	102,603	18,452

표 6. CF POF 시스템 시간별 조도 (2010년 10월 15일)

Time	Horizontal illuminance [Lux]	Direct illuminance [Lux]	Output average illuminance [Lux]
09:00	46,800	98,000	17,621
09:30	56,400	104,000	20,202
10:00	64,400	107,500	18,328
10:30	70,500	109,400	23,258
11:00	74,900	110,100	20,908
11:30	77,500	110,500	21,653
12:00	78,500	110,700	21,436
12:30	78,100	110,100	21,218
13:00	75,900	109,200	21,821
13:30	71,800	108,100	21,137
14:00	66,600	107,400	21,407
14:30	59,600	103,900	19,534
15:00	55,700	105,500	17,492
15:30	41,900	86,500	15,848
16:00	36,800	82,900	10,408
Average	63,693	104,253	19,485

4.3 CF POF 시스템 효율 분석

CF POF 시스템 효율은 식 (3)에 의해 구할 수 있다. 집광부에 도달한 광속(Φ_i)_C은 외부 법선면조도를 집광면적으로 곱함으로써 구할 수 있으며, 산광부를 통해 실내조명에 활용되는 광속(Φ_o)_D은 산광부 평균조도와 산광부 면적의 곱으로 나타낼 수 있다. 여기서 집광면적은 0.1753m²이고, 산광부 면적은 0.36m²이다.

$$\text{광속[Lumen]} = \text{조도[Lux]} \times \text{면적[m}^2\text{]} \quad (4)$$

표 7은 CF POF 시스템 실험에 의한 일별 평균 효율을 보여주고 있다. CF POF 시스템의 평균 효율은 37.5%로 나타났으며, 시간별 시스템의 평균 효율 데이터는 표 8과 같다.

표 7. CF POF 시스템 일별 평균 효율

Date	System input [Lumen]	System output [Lumen]	Efficiency [%]
10/15	18,276	7,014	38.4
10/26	18,043	6,697	37.1
Average	18,042	6,758	37.5

표 8. CF POF 시스템 시간별 평균 효율

	System input [Lumen]	System output [Lumen]	Efficiency [%]
09:00	16,636	5,980	35.9
09:30	17,705	6,706	37.9
10:00	18,389	6,664	36.2
10:30	18,845	7,734	41.0
11:00	19,038	7,723	40.6
11:30	19,178	7,711	40.2
12:00	19,204	7,538	39.3
12:30	19,055	7,366	38.7
13:00	19,020	7,442	39.1
13:30	18,582	7,302	39.3
14:00	18,503	7,377	39.9
14:30	17,951	6,989	38.9
15:00	18,643	5,730	30.7
15:30	15,356	5,353	34.9
16:00	14,532	3,747	25.8
Average	18,042	6,758	37.5

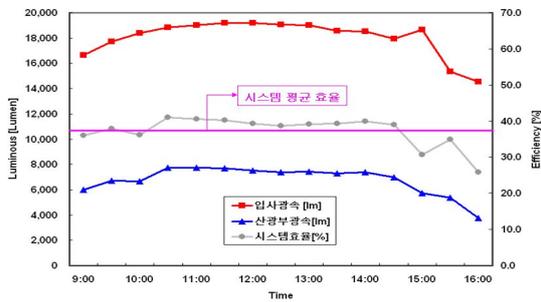


그림 6. CF POF 시스템 효율 분석 결과

그림 6은 CF POF 시스템의 시간별 효율 선도를 보여주고 있는데, 16:00시를 제외한 전시간대에서 시간에 상관없이 대체로 일정한 효율 분포를 보인다는 것을 알 수 있었다. 16:00시에 시스템 효율이 낮게 분포한 것은 시스템 추적상의 오차에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 결과는 고정형 주광 조명 시스템에서 오전과 오후 시간대에 시스템 효율이 낮게 나타나는 것과 대조를 보이는 것으로써, 청천공 상태에서는 태양 추적식 자연채광 시스템이 고정식 시스템보다 더욱 효과적으로 활용될 수 있음을 잘 보여주는 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 태양 추적식 자연채광 시스템의 일환으로 원형 프레넬 렌즈형 집광부와 플라스틱 광섬유인 CF POF 전송부, 그리고 산광부로 구성된 자연채광 시스템을 소개하였으며, 한국에너지기술연구원의 실증 건물에 이 시스템을 구현하여 청천공 상태에서의 시스템 효율을 분석해 보았다. 본 연구를 통한 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 원형 프레넬 렌즈형 집광부와 POF에 의한 전송부, 그리고 산광부로 구성된 CF POF 자연채광 시스템을 개발하였다.
- (2) CF POF 자연채광 시스템의 이론적 효율은 집광부, 전송부, 산광부 효율을 곱으로 나타내며, 약 41.9%로 계산되었다.

- (3) CF POF 자연채광 시스템을 실증 건물에 구현한 후 청천공 상태에서 측정된 시스템의 효율은 약 37.5%로 나타났다.
- (4) 실험에 의한 효율과 이론적 효율간의 오차는 약 10% 정도이며, 이론식은 구성요소간의 연결손실이 없다는 가정하에 효율을 구한 반면, 실제 효율은 시스템 구성시 구성요소간의 연결손실 발생에 따른 오차에 기인한 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 이의준, 집광형 광덕트 자연 채광 기술, 한국태양에너지학회지, v.7 n.1, 2008, pp.14~19.
2. 김희서, 지하공간에 있어서 자연채광 이용을 위한 채광덕트시스템 개발에 관한 연구, 한국태양에너지학회논문집, v.16 n.3, 1996, pp.37~46.
3. 한현주, 김정태, 자연채광을 위한 화이버 광학 집광기의 설계, 제작 및 성능 평가, 한국태양에너지학회논문집, v.27 n.4, 2007, pp.129~136.
4. Rosemann, A., Mossman, M., and Whithead, L., Development of a cost-effective solar illumination system to bring natural light into the building core, Solar Energy, Vol.82, No.4, 2008, pp. 302~310.
5. 알빈웨이 외, Development of New Solar Collection System for Light Pipe Technology, 한국태양에너지학회 춘계학술발표회논문집, 2004.05, pp.117~124.
6. 조명기술연구소, 태양광 집광채광기 성능평가 기술기준 개발, 산업자원부, 2006.
7. 경희대학교, 첨단 고성능 채광시스템의 통합화 설계기술개발, 과학기술부, 2006.