

# 광파이프 시스템의 채광성능 예측모델의 검증 및 적용

## Evaluation and Application of Prediction Models for the Daylight Performance of a Light-Pipe System

윤근영\*      신주영\*\*      김정태\*\*\*  
 Yun, Geun Young      Shin, Ju Young      Kim, Jeong Tai

### Abstract

The use of natural light has the potential for improving both the energy efficiency and indoor environmental quality in buildings. A light-pipe system can introduce daylight to spaces that would otherwise not be able to benefit from the advantages of daylight penetration. For the light-pipe system to be widely used in Korea, it is important to quantify its daylighting performance with due consideration regarding the effects imposed by the local climate conditions. This paper presents the evaluation results of existing semi-empirical models to predict daylighting performance of a light-pipe system. The evaluation of the existing models was based on the monitoring data obtained from a underground parking lot in which the light-pipe system was installed. Comparisons were made between the predicted and the monitored data obtained from the study. The results indicated that semi-empirical models which was developed using the experimental data obtained under the Korean climatic conditions had a good prediction performance. We also quantified the effects caused by sky conditions, solar altitudes, room dimensions, and the aspect ratio of a light-pipe system on both the daylighting performance of the light-pipe system and the indoor illuminance distributions of the space using the semi-empirical model. Finally, this paper provides the design guideline of the light-pipe system for its application to an underground parking lot space.

키워드 : 자연채광, 광파이프 시스템, 주광조도비, 채광성능, 예측모델

Keywords : Daylighting, Light-pipe system, Daylight Penetration Factor, Daylighting performance, Semi-empirical model

### 1. 서론

자연채광은 인간의 건강과 웰빙에 필수적인 요소이다. 자연광은 색의 재현성이 뛰어나며 인간의 시각적 반응과도 매우 유사한 특징이 있다<sup>1)</sup>. 또한, 건물내의 자연광의 부족은 계절증후군 (Seasonal Affective Disorder: SAD) 과 밀접한 관련이 있으며, 인간 생체리듬의 유지에도 큰 영향을 미친다<sup>2)</sup>.

광파이프 시스템은 일반적인 방법으로는 자연채광이 불가능한 건축공간에 자연광의 유입을 가능하게 한다. 광파이프 시스템은 미국 및 유럽에서 널리 사용되고 있으며<sup>3)</sup>, 국내에서도 다양한 광파이프 시스템이 개발되어 있다. 광파이프 시스템은 일조량 및 일조시간이 풍부한 우리나라에서 건축적 활용성이 높은 시스템이며, 일조가 부족한 다세대 가구, 밀도가 높은 주택단지, 지하공간에도 좋은 해결책이다.

이러한 광파이프 시스템을 건축물에 성공적으로 적용하기 위해서는 시스템의 자연채광성능의 정확한 예측이 필수적이다. 광파이프 시스템의 성능평가 방법은 크게 현장실측기법, 컴퓨터 시뮬레이션 기법, 채광성능 예측모델 기법으로 분류할 수 있다.

현장실측기법은 광파이프 시스템이 실제 적용된 건축물을 대상으로 하며 가장 정확하고 신뢰할 수 있는 방법이다. 그러나 다양한 대안을 평가하기에는 그 한계가 있다. Radiance 등을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 기법은 적은 비용으로 대안을 평가할 수 있는 장점이 있으나, 시뮬레이션 프로그램의 이론적 배경, 알고리즘의 한계와 적합성에 대한 검증이 필요하다. 예를 들어 Backward tracing 기법이 적용된 Radiance는 광파이프 시스템이 적용된 공간의 자연채광 성능 분석에는 취약점이 있다.

\* 경희대학교 건축공학과 전임강사 (gyyun@khu.ac.kr)  
 \*\* 경희대학교 건축공학과 박사과정 (jyshin@khu.ac.kr)  
 \*\*\* 교신저자, 경희대학교 건축공학과 교수 (jtkim@khu.ac.kr)

1) Bean R, "Lighting: Interior and Exterior", Elsevier, Oxford, UK, 2004.  
 2) Boyce P, "Human factors in lighting", CRC, 2003.  
 3) Zhang X, Muneer T, "Mathematical model for the performance of light pipes", Lighting Research & Technology, Vol.32(3), 2000, p.141-148.

예측모델을 이용한 평가방법은 현장실측으로 수집된 실측데이터의 통계적 분석과 조명이론식을 바탕으로 개발된다. 이 기법은 사용이 편리하고, 실제 천공상태 및 조도 조건을 고려한 다양한 설계 대안에 평가가 가능한 장점이 있다. 그러나 예측모델은 현장 실측조건과 다른 환경에 적용하기 위해서는 예측 성능 결과에 대한 신뢰성 검토가 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 기존에 국내외에서 개발된 광파이프 시스템의 예측 모델에 대한 신뢰성을 검토하고, 검증된 예측 모델을 적용하여 지하주차장에 설치 가능한 광파이프 시스템의 성능평가를 실시하는 것이다.

이를 위하여 광파이프 시스템이 적용된 지하공간을 대상으로 현장실측을 실시하고, 측정된 데이터를 이용하여 예측 모델을 검증하였다. 또한 주차장법 시행규칙에 따른 지하주차장의 조도 기준을 만족시키는 광파이프 시스템의 설계안을 제시하였다.

## 2. 광파이프 시스템의 예측모델

Zhang과 Muneer는 광파이프 시스템의 채광성능을 평가하기 위하여 주광조도비 (DPF: Daylight Penetration Factor)라는 개념을 제안하였다<sup>4)</sup>. 주광조도비란 확산광과 직달일사가 포함된 수평면 외부조도에 대한 실내 특정지점의 조도 비를 말한다. 즉 실내 지점의 주광조도비를 알게 되면 외부조도에 따른 실내의 조도를 예측할 수 있다. 주광조도비의 산정을 위한 Zhang 과 Muneer의 모델은 다음과 같다.

Zhang-Muneer 모델1 (식(1)):

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(356.7 - 572.4k_t - 1.2\alpha_s + 42.8k_t^2\alpha_s + 0.5k_t\alpha_s^2 - 0.9k_t^2\alpha_s^2)}{\rho^{(137.7+3.5A_p - 0.5\cot\alpha_s + 0.5A_p\cot\alpha_s)}} R^2(H/D)^m / D^2$$

Zhang-Muneer 모델2는 모델1을 단순화한 것으로서 수식은 다음과 같다.

Zhang-Muneer 모델2 (식(2)):

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(62.5 - 17.2k_t + 2.6\alpha_s)}{\rho^{(136.0+4.3A_p+1.1\cot\alpha_s-0.4A_p\cot\alpha_s)}} R^2(H/D)^m / D^2$$

여기서,  $k_t$ 는 천공청명도 (Sky clearness index),  $\alpha_s$ 는 태양고도,  $D$ 는 광파이프 시스템 확산부와 측정지점간의 거리,  $\rho$ 는 파이프의 표면반사율,  $A_p$ 는 시스템의 형상비 (지름에 대한 파이프 길이 비율),  $R$ 은 파이프의 반경,  $H$ 는 광파이프 확산부와 측정지점간의 수직거리를 나타낸다.

Zhang-Muneer 모델 1과 2는 태양의 위치와 천공상태에 따른 영향을 고려하였으며, 광파이프의 내부표면 반사

율에 따른 사항도 반영하고 있다. 본 모델은 광파이프 시스템이 적용된 공간의 실내 조도 분포를 예측하는 모델로 널리 사용되고 있다. 그러나 본 모델의 개발을 위한 현장실측시 광파이프 시스템의 길이는 0.6m와 1.2m로만 국한되었다. 따라서 시스템의 길이가 1.2m를 초과하는 경우에는 예측성능에 결과에 대한 검토가 필요하다.

국내에서는 Yun et al<sup>5)</sup>이 광파이프 시스템에 대한 국내의 현장측정 데이터를 바탕으로 광파이프 시스템의 예측 모델을 개발하였다. 이 예측 모델은 현장측정 데이터의 회귀분석과 조명의 조도 법칙에 기반을 둔다.

국내 예측모델1 (식(3)):

$$DPF_{(x,y,z)} = (0.1169k_t + 0.0037\alpha_s + 0.5171) \frac{e^{-0.11A_p\pi r^2\cos^4\theta}}{V^2}$$

국내 예측모델2 (식(4)):

$$DPF_{(x,y,z)} = (-1.988k_t - 0.0153\alpha_s + 0.0364k_t\alpha_s + 1.611) \frac{e^{-0.11A_p\pi r^2\cos^4\theta}}{V^2}$$

국내 예측모델3 (식(5)):

$$DPF_{(x,y,z)} = \frac{(0.1169k_t + 0.0037\alpha_s + 0.5171)\rho^{(-5.7126k_t - 0.5039\alpha_s + 63.3402)}}{e^{-0.11A_p\pi r^2\cos^4\theta}} \frac{1}{V^2}$$

여기서,  $\alpha_s$ 는 태양고도,  $r$ 은 광파이프 반지름,  $k_t$ 는 천공청명도,  $V$ 는 측정점에서 광파이프까지의 수직거리를 뜻하며,  $\theta$ 는 광파이프로 입사된 빛이 실내에 조사되는 지점과 광원과의 각도를 나타낸다.

위의 세가지 예측모델은 외부조도, 태양고도, 천공의 청정도 및 광파이프 시스템과 적용 건축공간에 대한 다양한 변수에 따른 실내조도와 주광조도비를 예측할 수 있으며, 기존의 국외에서 개발된 모델에 비하여 한국 기후조건에 적합하도록 개발된 특징이 있다.

## 3. 현장측정 및 예측모델 검증

### 3.1 지하주차장 현장측정 방법 및 분석

국내외에서 개발된 예측모델의 검증을 위하여 경기도 용인시 동천동 S건설 (위도:127.099°, 경도: 37.341°)의 아파트 단지 내 지하주차장 발전기실에 설치된 광파이프 시스템을 대상으로 현장측정을 실시하였다. 광파이프의

- 4) Zhang X., Munner T. "A design guide for performance assessment of solar light-pipes", Lighting Research and Technology, Vol.34(2), 2002, p.149~169
- 5) Yun G Y, Hwang T, Kim J T, "Performance prediction by modeling of a light-pipe system used under the climate conditions of Korea", Indoor and Built Environment, Vol.19(1), 2009

지름은 0.65m, 유도관의 길이는 3.4m, 형상비는 1:5.2로 설치되었다. 본 실험에 적용된 수직형 광파이프 시스템은 경희대학교와 (주)DOEL에서 공동 개발한 시스템으로 채광부는 아크릴돔과 돔 내부에 남향으로 설치된 보조반사체, 알루미늄 재질의 99% 반사율의 반사튜브, 실내에 빛을 조사하는 디퓨저(Prismatic)로 구성되어 있다. 발전실은 6.5m(W) × 16m(D) × 6.1m(H)의 크기로 실의 내부 벽면은 시멘트 블록, 천정과 바닥면은 콘크리트로 되어 있었다 (그림 1). 광파이프 시스템은 실내 동쪽 벽면에서 1.7m, 북쪽 벽면에서 8m 떨어진 지점에 설치하였다. 광파이프 시스템이 설치된 외부위치와 주변건물과의 각도를 대략적으로 계산하면, 서향 15°, 남향13°, 북향 30°로 각각 나타났다.

수평면조도의 측정점은 국내 지하주차장의 조도기준이 바닥면으로부터 85cm높이를 기준으로 함에 따라 바닥면에서부터 85cm높이에서, 광파이프 시스템의 중심부를 기준으로 가로, 세로 1.5m 간격으로 총18개(6×3)의 지점을 선정하여 설치하였으며, 외부조도는 광파이프 시스템이 설치된 부근에 2개의 센서를 설치하였다 (그림 1). 측정기기로는 조도센서는 Li-cor사의 LI-210SA, 데이터로거는 Li-cor사의 LI-1400, LI-1000을 사용하였다. 측정시간은 오전9시부터 오후 17시까지 5분 간격으로 측정하였다.

### 3.2 예측모델의 검증

#### 3.2.1 검증 기준

지하주차장에 설치된 광파이프 시스템의 채광성능 실적데이터와 예측모델의 예측결과를 비교하기 위하여 MBE(Mean Bias Error)와 RMSE (Root Mean Square Error)를 이용하였다. MBE는 예측모델에 의해 도출된 계산치와 측정치의 오차를 분석하기 위한 지표로서 두 데이터 간 편차의 평균을 나타낸 것으로 식6과 같다. MBE는 장기적인 성능평가모델에서 더 유효하며 MBE값이 최소가 될수록 이상적인 값으로 판단할 수 있다.

$$MBE = \frac{\sum(E_{estimated} - E_{measured})}{no. of datapoints} \quad \text{식(6)}$$

여기서, E<sub>estimated</sub>는 예측값 E<sub>measured</sub>는 실측값, no. of data points는 비교데이터수를 말한다.

RMSE는 MBE와 비슷한 의미로 사용되지만 오차 제곱 평균의 제곱근으로 예측모형을 선택하거나 비교할 때 이용되며 단기적인 성능평가에 유용하다. RMSE 값이 최소가 될수록 유효한 예측모형임을 나타내며, 그 식은 식7과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(E_{estimated} - E_{measured})^2}{no. of data points}} \quad \text{식(7)}$$

#### 3.2.2 검증결과

Zhang-Muneer에 의해 개발된 두 개의 모델 (Zhang-Muneer 모델 1, 2)은 Yun et al.의 모델 (국내 예측 모델 1, 2, 3)보다 MBE및 RMSE가 현저히 큰 것으로 나타났다 (표 1). 이는 국내 예측 모델의 광파이프 시스템에 대한 채광성능 예측성능이 우수함을 의미한다. 특히, Zhang-Muneer 모델 1과 2는 광파이프 시스템의 채광성능을 크게 과대평가하고 한다. 실측기간 전체의 MBE값을 살펴보면, Zhang-Muneer 모델 1과 2가 각각 9127 과 2783인데 비해 국내 예측 모델 1, 2, 3은 각각, 33, -134, 44로 나타나 큰 대조를 보이고 있다.

또한, Zhang-Muneer 모델 1을 단순화한 Zhnag-Muneer 모델 2는 오히려 모델 1보다 예측성능이 더 뛰어난 것으로 나타났다. Zhang-Muneer 모델 1의 RMSE 평균값이 13758인데 비하여, Zhang-Muneer 모델 2의 RMSE 평균값은 3919로 측정되었다.

Zhang-Muneer 모델 1과 2의 예측성능은 외부의 조도가 더 높을수록 감소하는 것으로 나타났다. 외부조도가 최소인 7월 22일에 나타난 Zhang-Muneer 모델 1의 MBE 및 RMSE 값은 각각 2302 및 3390 였다. 이에 반해, 외부조도가 최대인 조건에서 Zhang-Muneer 모델 1의 MBE의 RMSE 값은 각각 18065 및 24436로 나타났다. 이는 Zhang-Muneer 모델이 담청공이 주로 발생하는 영국의 기상조건하에서 실측된 광파이프 시스템의 실측데이터를 이용한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

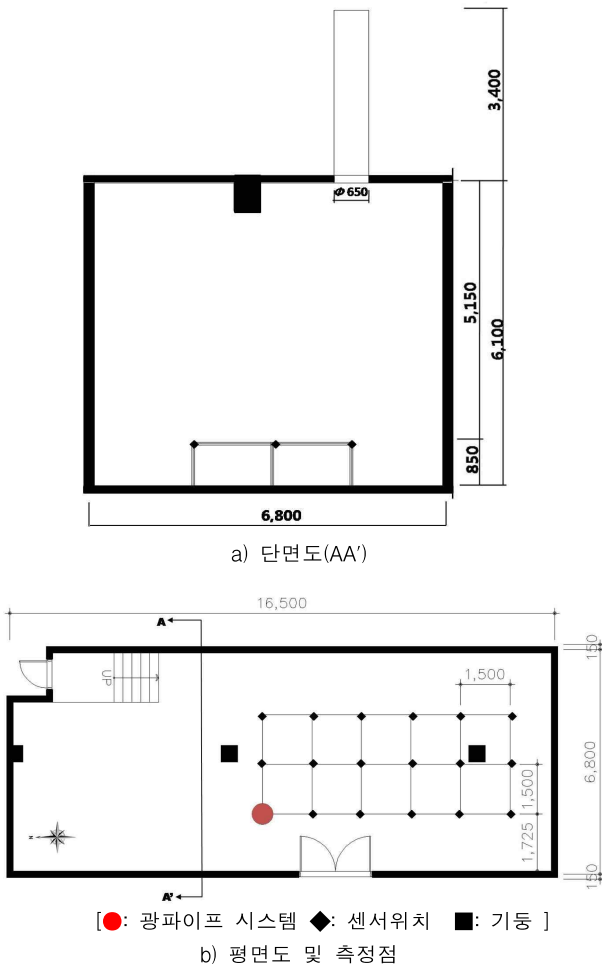


그림 1. 실험실의 형상 및 측정점

국내의 실제 기상조건하에서 얻은 실측데이터를 이용한 예측 모델에서는, 예측 모델1이 가장 우수한 예측성능을 나타냈다. 예측모델 1의 평균 MBE 및 RMSE는 각각 33 및 52였으며, 예측모델 2의 평균 MBE 및 RMSE는 -134 및 206로 3가지 국내 예측 모델 중 가장 큰 값을 나타냈다. 예측성능의 경향을 살펴보면, 국내 예측모델 1은 광파이프 시스템의 성능을 다소 과대평가하는 것에 반해, 예측 모델 2와 3은 과소평가하는 것으로 나타났다.

국내예측모델 1은 본 연구에서 검증한 다섯 개의 모델 중 최소의 MBE와 RMSE를 값을 나타내 가장 예측성능이 뛰어났다. 따라서 본 연구에서는 광파이프 시스템의 설계 및 성능 분석을 위해 국내예측모델 1을 사용하였다.

#### 4. 광파이프 시스템을 적용한 지하주차장의 설계

##### 4.1 분석개요

###### 4.1.1 기상조건

광파이프 시스템을 적용한 지하주차장의 설계를 위한 기상조건은 청천공, 부분담천공, 담천공으로 분류하였다. 천공상태의 분류는 식(8)의 천공의 청명도(Sky clearness Index: kt)를 계산하여 산정하였다. 천공상태별 태양고도에

따른 외부조도를 구하기 위하여 다음의 천공청명도식들을 이용하였다.

$$\text{천공청명도}(k_t) = \frac{\text{전일사량}}{\text{대기권밖에서수평면에 입사하는 입사량}} \quad \text{식(8)}$$

$$\text{대기권밖에서수평면에 입사하는 입사량} = 1367\sin(\alpha) \quad \text{식(9)}$$

천공청명도식을 이용하여 외부조도를 구하기 위해서는 먼저, 각각의 태양고도에 대하여 대기권밖에서 수평면에 입사하는 입사량을 계산한 후, 이를 이용하여 각각의 천공청명도에 대한 외부조도를 구한다. 마지막으로 각 천공상태별로 천공청명도를 분류하고 분류된 외부조도의 평균값을 이용하였다. 표2에 천공청명도식을 이용하여 구한, 천공상태에 따른 태양고도별 외부조도를 나타낸다.

예를 들어, 청천공의 태양고도 20°인때의 외부조도를 구하기 위해서는 20을 대입하여 대기권밖에서 수평면에 입사하는 입사량을 계산하고, 천공청명도 6.5에서 9.5에 해당하는 외부조도를 구한 후 그 값들의 평균값을 청천공상태의 태양고도20°일 때의 외부조도로 정하였다.

표 1. 실측값과 예측값의 데이터비교

구분	국외모델		국내모델			
	Zhang-Muneer 모델 1	Zhang-Muneer 모델 2	예측모델 1	예측모델 2	예측모델 3	
MBE	7/11(18722) <sup>1)</sup>	4901.4	1786.8	15.8	-86.5	-30.1
	7/16(57816)	18065.4	4921.1	63.7	-223.9	-73.4
	7/22(45930)	11459.7	3259.4	47.7	-162.3	-47.0
	7/23(39720)	10424.0	3202.1	42.9	-157.1	-46.8
	7/24(39240)	10031.4	2915.7	31.6	-121.4	-53.8
	7/27(19926)	4445.2	1671.8	24.6	-75.7	-19.0
	7/28(12518)	2302.1	1059.7	10.6	-53.5	-16.4
	7/29(45270)	13133.9	3755.8	40.7	-195.0	-63.9
	7/30(28870)	7383.4	2480.4	22.0	-125.8	-43.5
	평균	9127.4	2783.6	33.3	-133.5	-43.8
RMSE	7/11(18722) <sup>1)</sup>	8258.6	2704.5	27.7	144.7	61.4
	7/16(57816)	24436.3	6444.4	88.7	320.3	139.6
	7/22(45930)	16777.4	4542.0	75.3	246.2	95.2
	7/23(39720)	15132.6	4328.5	58.0	233.7	89.7
	7/24(39240)	17790.6	4730.9	55.4	232.4	120.9
	7/27(19926)	8002.0	2510.5	41.1	121.3	41.7
	7/28(12518)	3390.5	1467.9	15.8	81.5	29.2
	7/29(45270)	18722.9	5056.5	70.1	283.9	117.6
	7/30(28870)	11310.6	3465.8	38.7	191.0	81.8
	평균	13757.9	3916.8	52.3	206.1	86.3

1): 평균외부조도 (Ix)

표 2 천공상태별 태양고도에 따른 외부조건

태양 고도	천공상태 (kt)		
	청천공 (kt>0.6)	부분담천공 (0.2<kt≤0.6)	담천공 (kt≤0.2)
20	41144	21858	6429
30	60148	31954	9398
40	77325	41079	12082
50	92152	48956	14399
60	104179	58601	16278
70	113041	60053	17663
80	118468	62936	18511

4.1.2 실 면적

본 예측모델에서 고려된 광파이프시스템 1개의 최대 조사면적은 144m<sup>2</sup>로, 바닥면적이 12m×12m인 공간을 대상으로 연구를 진행하였다. 광파이프 시스템의 조사면적은 광 중심(A1)을 기준으로 각각 1.5m, 3m, 4.5m, 6m 떨어진 공간으로 구분하여 광파이프 한 개가 조사하는 면적이 9m<sup>2</sup>, 36m<sup>2</sup>, 81m<sup>2</sup>, 144m<sup>2</sup>인 공간이 되도록 구성하고 분석하였다 (그림 2). 또한 주차장법 조도기준의 충족여부를 판단하기 위해 바닥으로부터 85cm높이의 측정점을 선정하였다.

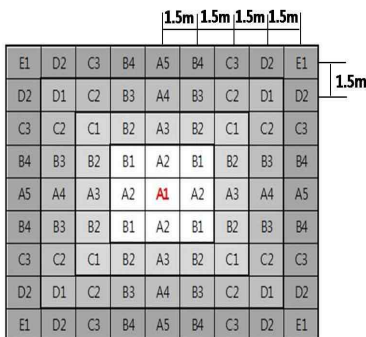


그림 2. 예측모델 분석면적

4.1.3 기타 실험변수

기상조건과 실면적에 대한 분석변수외에 고려된 실험변수는 실높이, 형상비 등이다. 분석공간의 실 높이는 2m~5m 안에서 0.5m 간격으로 총 7종류의 실높이를 선정하였다. 각각의 실높이에서는 지하주차장의 조도기준과 비교하기 위하여 바닥으로부터 85cm지점을 선정하였다. 광파이프 시스템의 형상비는 1:0.5에서 1:10까지 0.5간격으로 총 20종류의 형상비를 분석하는 것으로 선정하였다. 광파이프 시스템 조사면적의 평균 조도를 구하기 위한 각 측정점의 조도값은 각 측정점의 cosθ값을 계산하여 예측모델에 대입하였다. 예측모델을 이용한 광파이프 시스템의 채광성능 평가를 위한 외부변수, 실내변수, 시스템의 변수를 종합적으로 정리하면 표3과 같다.

표 3. 예측모델을 통한 채광성능 평가를 위한 변수

분석요소		변수
외부 변수	천공청명도 (kt)	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1
	태양고도 (a)	20 30 40 50 60 70 80
실내 변수	실높이 (m)	2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5
	조사면적 (m <sup>2</sup> )	9m <sup>2</sup> , 36m <sup>2</sup> , 81m <sup>2</sup> , 144m <sup>2</sup>
시스템 변수	형상비 (-)	0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.5 5
		5.5 6 6.5 7 7.5 8 8.5 9 9.5 10

4.2 기상 및 설계 변수에 따른 광파이프 채광성능

태양고도, 형상비 및 광중심으로부터의 거리에 따른 주광조도의 변화율을 표4에 나타낸다. 표4에 제시된 분석변수에 따른 주광조도비의 변화율은 천공상태와 관계없이 동일한 것으로 나타났다.

광파이프의 채광성능은 본 연구에서 고려한 외부변수, 실내변수 및 시스템 변수에 따라 민감한 변화를 보였다. 태양고도가 10° 증가함에 따라 주광조도비는 5% 증가하였다. 또한 실의 높이가 0.5m 증가할 경우 주광조도비는 약 20%감소하였다. 광파이프 1개당 조사면적도 광파이프의 채광성능에 큰 영향을 미치는 것으로 예측되었다. 예를 들어 광파이프 시스템의 중심부로부터의 거리가 1.5m 멀어질 수록 주광조도비가 -50% 감소하는 것으로 예측되었다. 따라서, 외부변수, 실내변수 및 시스템 변수 모두를 고려한 광파이프 시스템의 설계가 요구된다.

표 4. 분석변수에 따른 주광조도비의 변화율

	태양고도	형상비	실 높이	광중심으로 부터의 거리
변화율	+5%/10°	-6%/0.5	-20%/0.5m	50%/1.5m

4.3 지하주차장에 적용가능한 광파이프 시스템 설계

주차장법 시행규칙 제6조에서는 지하주차장의 조명기준을 바닥으로부터 85cm 높이에 있는 지점이 평균 70lux 이상의 조도를 유지해야 한다고 명시하고 있다. 본 연구에서는 광파이프 시스템 조사면적별로 각각의 실험변수에 의한 조도값이 법적 조도기준을 만족하는지 여부를 분석하여 정리하였다. 또한 외부 및 내부 변수 조건에 따라 지하주차장의 조명기준을 충족시키는 광파이프 시스템의 형상비를 제시함으로써, 광파이프 시스템의 설계시에 참고자료로 활용할 수 있도록 하였다. 분석은 천공 청명도에 따른 세가지 천공의 상태 즉, 천청공, 부분 담천공, 담천공으로 구분하여 이루어 졌다.

표5는 외부의 조도가 가장 낮은 담천공 상태에서의 설계 변수에 따른 조도기준 충족여부를 나타낸다.

표 5. 담천공 상태에서의 조도기준을 만족시키는 광파이프 시스템 형상비

실높이	태양고도	광파이프 시스템 조사면적			
		9m <sup>2</sup>	36m <sup>2</sup>	81m <sup>2</sup>	144m <sup>2</sup>
2m	20	≤ 10	≤ 10	≤ 5	< 0.5
	30	≤ 10	≤ 10	≤ 9	≤ 4.5
	40	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 7.5
	50	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 9.5
	60	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	70	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	80	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
2.5m	20	≤ 10	≤ 8	≤ 4	< 0.5
	30	≤ 10	≤ 10	≤ 8	≤ 4
	40	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 6.5
	50	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 9
	60	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	70	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	80	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
3m	20	≤ 9.5	≤ 6	≤ 3	< 0.5
	30	≤ 10	≤ 10	≤ 7	≤ 3
	40	≤ 10	≤ 10	≤ 9.5	≤ 6
	50	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 8
	60	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 9.5
	70	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
	80	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
3.5m	20	≤ 6.5	≤ 4	≤ 1.5	< 0.5
	30	≤ 10	≤ 8	≤ 5.5	≤ 2
	40	≤ 10	≤ 10	≤ 8	≤ 5
	50	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 7
	60	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 8.5
	70	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 9.5
	80	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 10
4m	20	≤ 4	≤ 2	< 0.5	< 0.5
	30	≤ 8	≤ 6	≤ 4	≤ 1
	40	≤ 10	≤ 9	≤ 7	≤ 4
	50	≤ 10	≤ 10	≤ 9	≤ 6
	60	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 7.5
	70	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 8.5
	80	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 9.5
4.5m	20	≤ 1.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
	30	≤ 6	≤ 4.5	≤ 2.5	< 0.5
	40	≤ 9	≤ 7	≤ 5.5	≤ 2.5
	50	≤ 10	≤ 9	≤ 7.5	≤ 5
	60	≤ 10	≤ 10	≤ 9	≤ 6.5
	70	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 7.5
	80	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 8.5
5m	20	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
	30	≤ 4	≤ 2.5	< 0.5	< 0.5
	40	≤ 7	≤ 5.5	≤ 4	≤ 1.5
	50	≤ 9	≤ 7.5	≤ 6	≤ 3.5
	60	≤ 10	≤ 9	≤ 7.5	≤ 5
	70	≤ 10	≤ 10	≤ 9	≤ 6.5
	80	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 7

지하주차장법 조도기준(70lux) 불충족 조건

담천공 상태에서는 실의 높이와 광파이프 시스템 한 개가 담당하는 조사면적이 실내조도 수준을 결정하는 중요한 요소로 나타났다. 예를 들어, 광파이프 시스템의 조사면적 9m<sup>2</sup>인 공간에서는, 실높이가 3m이하인 경우 대부분의 광파이프 형상비에서 조도기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 실높이가 3.5m 이상인 경우에는, 매우 제한적인 형상비에서만 조도기준을 만족시키는 것으로 분석되었다. 또한 태양고도가 상대적으로 낮아질수록 조도기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 반면 높은 태양고도에서는 조사된 대부분의 형상비에서 지하주차장의 조도기준을 만족시키는 것으로 나타나 태양고도가 높은 시간대에는 담천공 상태에서도 광파이프 시스템이 인공광원의 사용을 대체할 수 있는 가능성이 높은 것으로 나타났다.

광파이프 시스템의 조사면적이 36m<sup>2</sup>인 공간에서도 태양고도가 60°이상인 경우에는 모든 실 높이와 형상비에 대하여 조도기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 태양고도 60°이하에서는 실높이 3.5m 이상, 형상비 4이상의 조건인 경우, 주간에 인공 조명설비의 사용이 필수적인 것으로 나타났다.

광파이프 시스템의 조사면적이 81m<sup>2</sup>이상인 공간에서는 실높이가 2m인 경우에도 광파이프의 형상비와 태양의 고도에 따라 지하주차장의 조도기준을 만족하지 못하는 경우가 나타났다. 예를 들어 태양의 고도가 40°이며 조사면적이 144m<sup>2</sup>인 공간에서는 광파이프의 형상비가 8이상인 조건에서는 조도기준을 충족시키지 못하는 것으로 분석되었다. 이처럼 담천공 상태에서는 주간에 광파이프 시스템의 사용만으로는 조도기준을 만족시킬 수 없는 경우가 발생하며, 따라서 외부조건의 변화에 따라 적절히 인공조명설비를 사용하는 것이 요구된다.

표6은 청천공과 부분담천공 상태에서 채광성능이 가장 불리한 조건인 조사면적 144m<sup>2</sup>, 실높이 5m일 때의 조도기준의 만족여부를 나타낸다. 외부의 평균 조도 수준이 41,144lux 이상인 청천공인 경우에는 본 연구에서 고려된 실높이 및 조사면적과 형상비에 대해서 모두 법적인 조도기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 즉, 실높이가 5m 이하, 조사면적이 144 m<sup>2</sup>이하, 형상비는 10이하인 경우 실의 평균 조도는 70lux이상으로 예측되었다. 따라서, 천청공 상태에서는 광파이프 시스템의 설치로 인한 조명에너지의 절감효과가 매우 클 것으로 판단된다.

외부의 평균 조도 수준이 21,858lux 이상인 부분담천공 하에서는 조사면적이 81 m<sup>2</sup>이하의 경우, 모든 광파이프 시스템 형상비에서 조도 기준을 만족하였다. 조사면적이 144 m<sup>2</sup>인 공간에서도 조사된 대부분의 광파이프 시스템의 형상비에서 평균 실내조도가 70lux 이상으로 나타났다. 다만, 태양의 고도가 20°이며 광파이프 시스템의 형상비가 7이상인 경우에는 평균 실내조도가 70lux 이하로 예측되어, 법적인 요구조건을 충족시키지 못하는 것으로 분석되었다. 따라서 태양의 고도가 20° 이하에서는 법적 요구조건을 충족시키기 위하여 주간에 인공 조명을 사용할 필요가 있는 것으로 분석되었다.

표 6. 청천공, 부분담천공상태에서 조도기준을 만족시키는 광파이프 형상비 (조사면적 144m<sup>2</sup>)

실높이	태양고도 (°)	천공상태	
		청천공	부분담천공
5m	20	≤10	≤6.5
	30	≤10	≤10
	40	≤10	≤10
	50	≤10	≤10
	60	≤10	≤10
	70	≤10	≤10
	80	≤10	≤10

지하주차장법 조도기준(70lux) 불충족 조건

### 5. 결론

본 연구에서는 광파이프 시스템의 성능예측 방법 중 사용이 용이하며 설계 단계에서의 적용성이 높은 기법인 예측모델 방법에 대하여 현장실측결과를 이용하여 검증 하였고, 검증된 모델을 이용하여 지하주차장에 적용 가능한 광파이프 시스템의 설계안을 제시하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) Zhang-Muneer 모델은 국내의 기상조건하에서는 광파이프의 채광성능을 과대 평가하는 것으로 나타남.
- 2) 국내의 기상조건에서 얻은 현장실측 데이터를 바탕으로 개발된 예측모델은 예측 성능이 매우 우수하여 국내 기후조건을 고려한 광파이프 시스템의 채광성능 평가에 유용할 것이라 판단됨.
- 3) 국내 예측모델을 이용한 외부변수, 실내변수, 시스템 변수에 따른 광파이프 시스템의 성능분석 결과, 광파이프 시스템이 적용된 실의 평균 조도 수준은 외부변수인 천공천명도 및 태양고도와는 비례의 관계가 있는 반면, 실내변수인 실높이와 조사면적, 그리고 시스템 변수인 광파이프의 형상비와는 반비례하는 것으로 나타남.
- 4) 광파이프 시스템이 적용된 지하주차장의 주간 조도 수준은 청천공과 부분담천공 상태에서는 태양의 고도가 20°인 경우를 제외한 모든 조건에서 지하주차장의 법적인 조도 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 따라서 광파이프 시스템이 지하주차장에 적용될 경우, 에너지 절약 가능성이 매우 높은 것으로 판단됨.
- 5) 담천공 상태에서는 제한적인 범위에서만 실의 평균 조도가 법적인 요구 조건을 충족하는 것으로 나타났으며, 특히 조사면적이 85m<sup>2</sup>이상인 경우는 한 대 이상의 광파이프 시스템의 설치나 추가적인 조명이 필요한 것으로 분석됨.

### Acknowledgement

본 연구는 2009년도 경희대학교 신진연구지원에 의한 결과임 (KHU-20090741).

### 참고문헌

1. 신주영, 김곤, 김정태, (2009) “광파이프 시스템의 조명기술 및 건축적 활용연구”, 한국생태환경건축학회 논문집, 제9권 제1호, pp.69~76
2. 신주영, 김정태, (2009) “지하주차장에 적용된 광파이프 시스템의 채광성능 평가에 관한 예비실험”, 한국생태환경건축학회 하계학술발표대회논문집, 통권16호, pp.45~48
3. 공효주, 김정태, (2008) “천공상태에 따른 수직형 광파이프 시스템의 채광성능 평가”, 한국생태환경건축학회 논문집, 제8권 제3호, pp.101~106
4. Bean R, “Lighting: Interior and Exterior”, Elsevier, Oxford, UK, 2004.
5. Boyce P, “Human factors in lighting”, CRC, 2003.
6. Zhang X, Muneer T, “Mathematical model for the performance of light pipes”, Lighting Research & Technology, Vol.32(3), 2000, p.141-148.
7. Zhang X., Munner T. “A design guide for performance assessment of solar light-pipes”, Lighting Research and Technology, Vol.34(2), 2002, p.149~169
8. Yun G Y, Hwang T, Kim J T, “Performance prediction by modeling of a light-pipe system used under the climate conditions of Korea”, Indoor and Built Environment, Vol.19(1), 2009

---

투고(접수)일자: 2010년 1월 18일

심사일자: 2010년 1월 19일

게재 확정일자: 2010년 2월 22일