

CIE 표준 담천공과 청천공 모델의 천공 휘도분포 예측 방법에 관한 연구

A Study on Prediction Method of Sky Luminance Distributions for CIE Overcast Sky and CIE Clear Sky

김철호* · 김강수**†

Kim Chul-Ho*, Kim Kang-Soo**†

(Received 25 January 2016; accepted 20 April 2016)

Abstract : Daylight is an important factor which influences building energy efficiency and visual comfort for occupants. It is important to predict precise sky luminance at the early stages of design to reduce light energy in the building. This study predicted sky luminance distributions of standard sky model(CIE overcast sky, CIE clear sky) that was provided from the CIE(Commission internationale de l'éclairage). Afterward, result of sky luminance was compared and verified with simulation value of Radiance program. From the CIE overcast sky, zenith and horizon ratio is about 3:1. From the CIE clear sky, luminance value gets most high value around the sun. On the other hand, luminance value is the lowest in the opposite direction of the sun when angle is 90° between the sun and sky element. As a result of comparing the calculation results with Radiance program, sky luminance prediction error rate is 0.4~1.3% when it is CIE overcast sky. Also, sky luminance prediction error rate is 0.3~1.5% when it is CIE clear sky. When compared with the results of radiance simulation, it was evaluated as fairly accurate.

Key Words : 천공 휘도 분포(Sky luminance distributions), CIE 표준 담천공(CIE standard overcast sky)
CIE 표준 청천공(CIE standard clear sky), 예측 방법(Prediction method), 래디언스(Radiance)

**† 김강수(교신저자) : 고려대학교 건축학과
E-mail : kskim@korea.ac.kr, Tel : 02-3290-3335
*김철호 : 고려대학교 대학원 건축학과
E-mail : kchcd@korea.ac.kr

**† Kim Kang-Soo(corresponding author) : Department of
Architecture, Korea University.
E-mail : kskim@korea.ac.kr, Tel : 02-3290-3335
* Kim Chul-Ho : Department of Architecture, Graduate School,
Korea University. E-mail : kchcd@korea.ac.kr

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건물에서 자연채광은 재실자에게 시각적 만족감을 제공하고, 인공조명 및 냉난방 에너지 사용량과 밀접한 관련이 있어 에너지 효율에 중요한 영향을 미친다.¹⁾²⁾ 최근 이런 자연채광에 대한 중요성이 부각되고 있으며 이에 대한 연구가 다양한 방법으로 진행되고 있다. 여기서 중요한 점은 실내 주광조도 계산 시 천공의 상태에 대한 예측이 필요하며 이를 바탕으로 천공휘도의 평가가 선행되어야 한다는 것이다. 하지만 실제 천공의 상태는 매우 다양하여 객관적인 결론을 도출하기 어렵기 때문에 외부 천공 상태에 대한 정확한 예측이 필요하다.

이에 CIE(Commission internationale de l'éclairage :국제조명위원회)³⁾에서는 자연채광 설계용 천공으로서 표준 천공을 제공하고 있다. 이 같은 천공 모델은 건물 초기 설계 시 실내 주광조도 예측이나 조명 제어 전략에 도움을 주고 이에 따른 조명 에너지 절약 향상을 가능하게 한다.

표준 천공을 재현하는 평가 시설로는 Sky Simulator, Artificial Sky Dome, Sky Scanner 등이 이용되고 있으나 이는 사용자의 전문성이 요구되며 시간과 비용이 소모된다는 제약이 있다. 그 동안의 대부분 연구들도 평가 시설을 활용하여 기준 천공 상태를 평가하였고, 간단하게 천공 상태를 구현 할 수 있는 알고리즘의 이론 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 CIE General Sky Model의 이론 고찰을 통해 천공 휘도분포 구현 알고리즘을 구축하고, 이런 과정에서 구현된 천공별 휘도분포의 유용성을 확보하기 위해 Radiance 시뮬레이션 결과와 비교, 검토하여 실내 주광조도 예측 연구에 기여하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

(1) 이론 고찰 및 CIE 천공 휘도분포 계산
천공 휘도분포를 계산하기 위해 국제조명위원회(CIE)에서 제시한 CIE 표준 천공 및 CIE General Sky Concept에 대한 이론을 고찰하고, 알고리즘 흐름도를 만들어 천공의 종류, 태양 위치에 따른 천공 휘도 분포를 구현했다.

(2) Radiance 시뮬레이션을 통한 비교, 검증

CIE overcast sky와 CIE clear sky 천공 모델의 휘도분포 결과를 Radiance 프로그램 시뮬레이션 값과 비교하여 검증하였다. Radiance는 미국 로렌스 버클리 국립 연구소(LBNL)에서 개발된 프로그램으로 다양한 빛 환경 시뮬레이션이 가능하며 이미 여러 선행연구들을 통해 예측 정확성이 검증되었다.⁴⁾

2. 이론 고찰

2.1 선행연구 고찰

R. Kittler 외 연구⁵⁾에서는 건축 초기 설계 시 건축가와 엔지니어로 하여금 실내의 주광조도 예측의 편의성을 위해 ISO/CIE Sky type을 분류하고, 각 천공 유형별로 천정 휘도로부터 수평면까지 정규화 된 상대 휘도분포를 산출하였다.

Danny H.W.Li 외 연구⁶⁾에서는 실내 빛 환경 평가를 위해 홍콩의 실제 답천공 시 일사량 및 천공 휘도분포를 분석하여 Database화 하였으며 이를 CIE overcast sky와 비교하여 홍콩 답천공의 실제 천공 상태를 평가하였다.

Norio Igawa 외 연구⁷⁾에서는 도쿄의 다양한 천공 상태의 휘도분포를 Clear sky index와 Cloudless index로 나누어 분석하고, 이를 기 연구된 다양한 Sky model 이론들과 비교하여 평가하였다. S. Chirarattananon 외 연구⁸⁾에서도 방콕의 실제 답천공 시 천공 휘도분포를 자세히 분석하고 실내 주광를 평가를 실시하였다.

2.2 CIE Standard Sky Model

(1) CIE 표준 담천공(CIE Overcast Sky)

CIE 표준 담천공 모델은 실제 담천공의 휘도와 유사한 상태를 모델로 정한 것이며, 주광률 계산을 위해 국제조명위원회(CIE)에 의해 채택된 표준 설계 천공(Standard Design Sky)이다. 불균일한 휘도 분포를 보이며 천정(Zenith)과 수평면(Horizon)과의 휘도비는 약 3:1로 가정한다. 이때의 천공 모델은 식 (1)과 같다.³⁾

$$\frac{L_r}{L_z} = \frac{1 + 2\sin\gamma}{3} = \frac{1 + 2\cos Z}{3} \quad (1)$$

L_r = Luminance of a sky element (cd/m²)

L_z = The zenith luminance (cd/m²)

r = The elevation angle of a sky element above the horizon

Z = The angular distance between a sky element and the zenith

(2) CIE 표준 청천공(CIE Clear Sky)

CIE 표준 청천공 모델은 태양 부근에서 가장 휘도가 높고 태양 위치로부터 90°의 각도에 있는 천공 부근에서 가장 낮은 휘도를 갖는다는 것을 가정하고 있다. CIE 표준 청천공의 휘도 분포는 천공 성분의 고도각과 방위각 및 태양의 고도각과 방위각을 중요한 변수로 한다. 이때 널리 사용되어지는 청천공의 모델은 R. Kittler에 의해 제시된 식 (2)와 같다.³⁾

$$\frac{L_{\gamma\alpha}}{L_z} = \frac{(1 - e^{-0.32/\sin\gamma})(0.91 + 10e^{-3\chi} + 0.45\cos^2\chi)}{0.274(0.91 + 10e^{-3Z_s} + 0.45\cos^2 Z_s)} \quad (2)$$

L_{ra} = Luminance in any arbitrary sky element (cd/m²)

χ = The angular distance of the sky element from the sun

Z_s = The zenith distance of the sun

(3) The CIE General Sky Concept

CIE Standard S011/2003³⁾에서는 CIE 표준 천공을 Indicatrix(타원체) 및 Gradation(상대적 밝기) 그룹으로 정의하고 있으며 R. Kittler의 연구⁵⁾⁹⁾에서도 CIE General Sky를 타입 별로 분류하고 천공 휘도분포를 구현하였다.

이 연구들⁵⁾⁹⁾의 분석에 의하면 천공의 휘도 분포를 구현하기 위해서는 태양과 임의 천공 성분 지점의 위치 뿐 만 아니라 태양과 천공 상태와 관련한 a, b, c, d, e 각각의 계수 또한 중요한 요소임을 제안하고 있다.

각 계수들의 상세한 설명은 R. Perez의 연구¹¹⁾에 자세히 제시되어 있으며 담천공, 균일 담천공, 중간천공, 청천공의 대표적인 천공 모델에 따른 계수들의 값은 Table 1과 같다.

다음 장의 Fig. 1은 태양의 위치와 임의의 천공 성분 위치를 기반으로 CIE General Sky의 천공 상대휘도 분포의 비율을 구현하기 위한 다이어그램을 나타낸 것이다.

Table 1. CIE general standard sky model's parameters

Type	Gradation Indicatrix		a	b	c	d	e	Description of luminance distribution
	I	2						
1	I	1	4.00	-0.70	0.00	-1.00	0.00	CIE Standard Overcast Sky , Alternative form steep luminance gradation towards zenith, Azimuthal uniformity
2	I	2	4.00	-0.70	2.00	-1.50	0.15	Overcast Sky , with steep luminance gradation and slight brightening towards the sun
5	III	1	0.00	-1.00	0.00	-1.00	0.00	Sky of Uniform Luminance
6	III	2	0.00	-1.00	2.00	-1.50	0.15	Partly Cloudy Sky , No gradation towards zenith, Slight brightening towards the sun
11	IV	4	-1.00	-0.55	10.00	-3.00	0.45	White-blue sky with distinct solar corona
12	V	4	-1.00	-0.32	10.00	-3.00	0.45	CIE Standard Clear Sky , Low illuminance turbidity

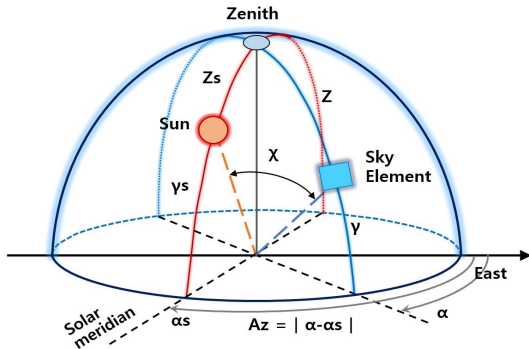


Fig. 1. Diagram for position of the sun and sky element

CIE General Sky Model에서 천정 휘도에 대한 임의의 천공성분의 상대 휘도비율은 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다.⁵⁾

$$\frac{L_{\gamma\alpha}}{L_z} = \frac{f(\chi)\phi(Z)}{f(Z_s)\phi(0^\circ)} \quad (3)$$

L_{ra} = Luminance in any arbitrary sky element (cd/m^2)
 L_r = Luminance of a sky element (cd/m^2)

태양과 임의의 천공성분 사이의 각도 χ 는 식 (4)와 같다. 이는 천정과 천공 사이의 각인 Z 와 태양과 천정의 각인 Z_s , 태양 자오선과 천공 방위각 사이의 각인 Az 로 계산된다.⁹⁾

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos Az) \quad (4)$$

$Az = |\alpha - as|$ α and as are azimuthal angles of the vertical plane of the sky element and sun position respectively

함수 $f(\chi)$ 는 태양과 천공성분의 각도로 표현되는 상대 휘도비율에 관한 Indicatrix 함수이며 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.⁹⁾

$$f(\chi) = 1 + c(\exp(d\chi) - \exp(d\pi/2)) + e \cos^2 \chi \quad (5)$$

χ = The angular distance of the sky element from the sun

함수 $f(Z_s)$ 는 천정과 태양 사이의 고도각과 관련된 Indicatrix 함수이며 식 (6)과 같다.⁹⁾

$$f(Z_s) = 1 + c(\exp(dZ_s) - \exp(d\pi/2)) + e \cos^2 Z_s \quad (6)$$

Z_s = The zenith distance of the sun

휘도의 Gradation 함수인 $\phi(Z)$ 는 천정과 천공성분 사이의 고도각 Z 와 관계있으며 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.⁹⁾

$$\phi(Z) = 1 + a \exp(b/\cos Z), \quad \phi(0^\circ) = 1 + a \exp b \quad (7)$$

when $0 \leq Z \leq \pi/2$ and at the horizon is $\phi(\pi/2) = 1$

또한 본 연구에서는 R. Kittler의 연구⁵⁾⁹⁾에서 제시된 식 (8)과 (9)를 이용하여 천공별 임의의 천공성분 휘도를 계산하였다.

천공의 휘도 혼탁인자인 Luminous turbidity factor(T_v)값이 12이상인 천공에서는 식 (8)을 적용시키며, T_v 값이 12이하인 맑은 천공에서는 식 (9)를 적용시킬 수 있다. 식 (8), (9)에 적용되는 각 계수의 값(A, B, C, D, E, T_v)은 R. Kittler의 연구⁵⁾⁹⁾에 상세히 기술되어 있다.

$$L_z = \frac{D_v}{E_v} \left[\frac{B(\sin \gamma_s)^C}{(\cos \gamma_s)^D} + E \sin \gamma_s \right] [kcd/m^2] \quad (8)$$

E_v = Extraterrestrial horizontal illuminance(lx)

L_z = Luminance of a sky element (cd/m^2)

D_v = Diffuse sky illuminance(lx), γ_s = Elevation angle of the sun

$$L_z = A \sin \gamma_s + 0.7(T_v + 1) \frac{(\sin \gamma_s)^C}{(\cos \gamma_s)^D} + 0.04 T_v \quad (9)$$

$$A = (A1 T_v + A2)$$

A, B, C, D, E = Parameters characterizing a certain sky standard

T_v = The luminous turbidity factor

3. 해석모델의 개요 및 휘도분포구현 알고리즘

3.1 해석모델의 개요

해석모델은 추후 천공 휘도를 이용하여 진행 할 연구까지 고려하였으며 다음 Fig. 2와 같다.

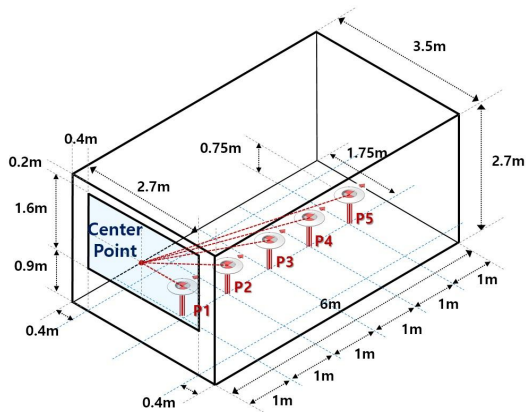


Fig. 2. Model for sky luminance simulation and calculation

폭 3.5m, 깊이는 6m, 천장고는 2.7m의 일반적인 오피스 한 개의 실을 가정하였다. 또한 실내의 특징지점에서 바라본 천공 휘도를 비교 검증할 것이 때문에 천공을 바라보는 지점은 1m 간격으로 총 5개의 지점으로 설정하였고 높이는 0.75m이다. 이 지점은 추후 연구에서 조도센서 설치지점으로 활용할 수 있다.¹⁾¹⁰⁾ 천공 휘도(장면 중앙점 휘도)를 Radiance로 직접 비교, 검증하기 위해서 우리는 없는 것으로 가정하였다.

3.2 천공 휘도분포 구현 알고리즘

Fig. 3은 CIE 표준 답천공과 표준 청천공의 천공 휘도분포를 구현하기 위한 2.2에서 설명한 알고리즘의 흐름도를 나타낸 것이다.

즉, 태양의 위치와 천공의 위치(고도, 방위각)를 알면 식 (3)을 구성하는 식 (4), (5), (6), (7)의 결과값을 구할 수 있으며, 이렇게 도출된 식 (3)의 결과값을 이용하여 천정 휘도로 천공 휘도를 나

눈 비율을 구할 수 있다. 또한, 식 (8)과 식 (9)에 태양의 위치(고도, 방위각)를 입력하여 답천공과 청천공의 천정 휘도를 구할 수 있고, 각 천공 모델의 천공 휘도는 앞서 구한 식 (3)에 식 (8)과 식 (9)의 결과를 각각 곱하여 구할 수 있다.

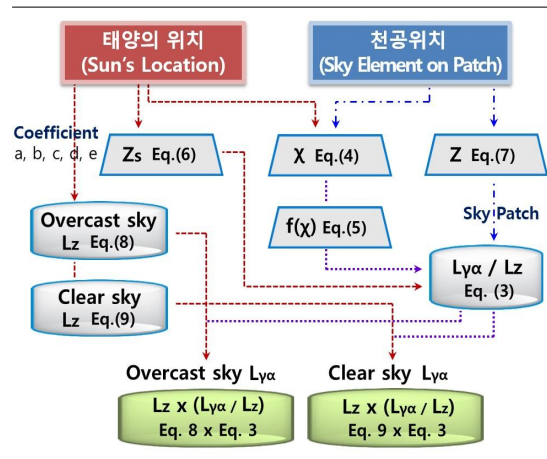


Fig. 3. Algorithm of sky luminance distribution

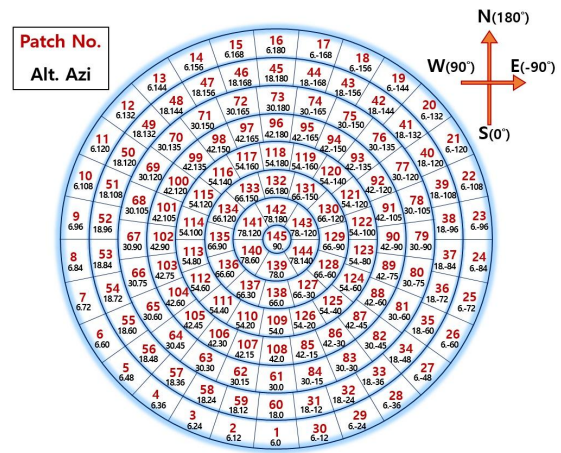


Fig. 4. Measurement points for the sky patches

이 휘도 값들을 천공의 고도와 방위각에 맞추어 Fig. 4의 Sky Patches에 적용하면 천공 휘도분포를 구할 수 있다. Fig. 4는 CIE 표준 답천공과 CIE 표준 청천공의 상대 휘도분포를

구현하기 위해 145개의 Sky Elements로 나눈 천공 이미지를 나타낸 것이다. 각각의 셀에는 패치의 번호, 천공 성분의 고도각, 방위각 정보가 입력된다. 이렇게 나뉜 천공 휘도성분으로 천공의 휘도분포를 구현할 수 있으며 실내 주광 조도 예측¹⁾¹⁰⁾ 등 자연 채광과 관련된 연구를 위한 중요한 자료로 사용할 수 있다.

4. 결과 분석

4.1 천공 휘도분포

Fig. 5는 3.2의 천공 휘도분포 알고리즘을 이용하여 계산한 천정 휘도에 대한 천공 휘도 비율을 나타낸 그래프이다. Fig. 5의 왼쪽 그래프는 기존 선행연구¹¹⁾에서 수행된 태양 고도가 60°일 때의 담천공과 청천공 휘도분포와 본 연구에서의 구현한 휘도분포 결과를 비교, 검증한 것이다. 담천공과 청천공 모두 선행연구¹¹⁾의 그래프 분포와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 담천공의 천공 휘도분포를 구현했을 때 천정 휘도에 대한 천공의 상대 휘도분포 비율은 0.3~1의 범위를 나타낸다. 청천공 시는 천정 휘도에 대한 천공의 상대 휘도분포 비율이 태양 부근에서 약 3.9로 가장 높으며,

태양위치로부터 반대편 90° 부근 천공에서는 가장 낮은 휘도값인 약 0.4를 나타낸다. 이를 바탕으로 Fig. 5의 오른쪽 그래프에는 담천공 시 3. 21일 10:00(AM)의 천공 휘도 비율(천공 휘도/천정휘도)분포와 청천공 시 3, 6, 9, 12. 21일(계절별 대표일) 10:00(AM)의 천공 휘도 비율 분포를 나타냈다. 담천공의 휘도분포는 선행연구를 검증한 결과와 동일하다.

청천공 휘도분포 결과를 검토하면 전체적으로 태양 부근에서 천공 휘도가 가장 높고 태양 위치로부터 반대편 90°의 천공에서 가장 낮다. 계절별 대표일의 휘도분포는 태양의 고도에 따라 휘도분포가 달라지며, 태양 고도가 낮아질수록 태양 부근에서의 상대 휘도 비율이 높은 경향을 나타낸다. 즉, 태양고도가 낮은 12. 21일의 경우 태양 부근에서 천공 휘도 비율(MAX 13.4)이 가장 높으며 태양고도가 높은 6. 21일의 경우는 태양부근의 휘도 비율(MAX 5.3)이 낮아진다. Table 2에는 Sky Patches상에 3. 21일 10:00 (AM) 담천공의 휘도분포를 Gradation(상대적 밝기) 이미지로 구현하였다.

표준 담천공의 휘도분포는 천정 부근(No.145 Patch)에서 가장 높다. Fig. 5에서와 같이 천

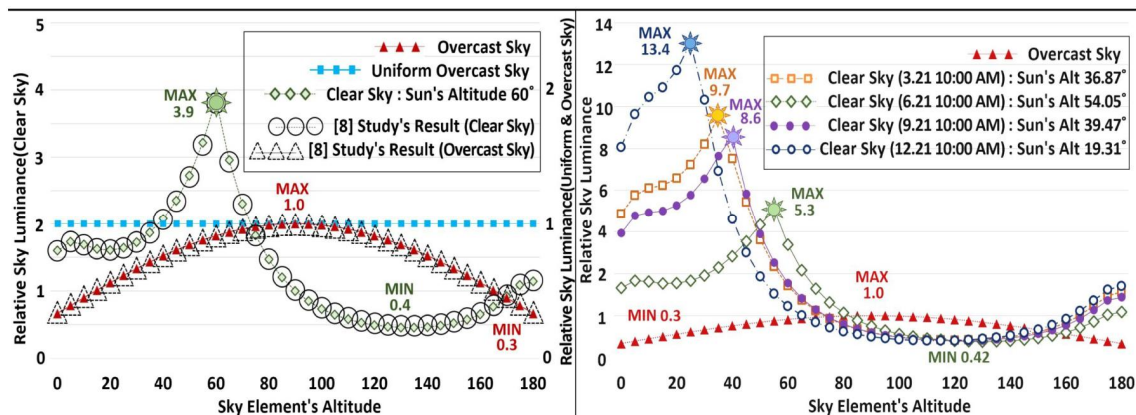


Fig. 5. Validation and calculation of sky luminance distribution depends on sky element's altitude

정 휘도는 지평면 부근 휘도의 약 3배 정도 밝은 천공을 나타낸다. 또한 답천공 시, 천공의 위치가 같은 고도일 때 모든 방위각 방향에서의 천공 지점에서는 같은 휘도값을 갖는다.

Table 2. Sky luminance distribution of CIE overcast sky

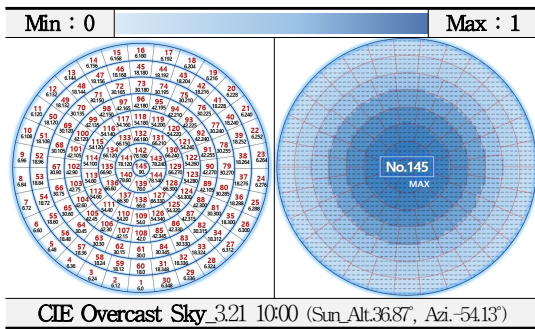
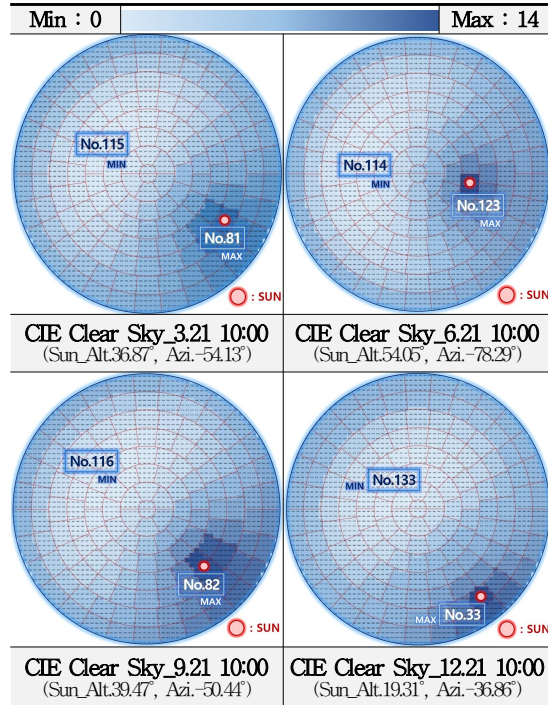


Table 3에는 청천공 시 3, 6, 9, 12, 21일(계절별 대표일) 10:00(AM)의 휘도분포를 Sky Patches상에 Gradation(상대적 밝기) 이미지로 구현하였다.

Gradation 이미지는 청천공 시 계절별로 태양 고도에 따라 분포가 달라지지만 태양 부근에서 천공 휘도가 가장 높고 태양 위치로부터 반대편 90°의 천공에서 가장 낮다는 공통점이 있다. 3월 21일 10:00(AM)의 휘도분포는 태양이 위치한 곳(Alt.36.87°, Azi.-54.13°)인 No.81 Patch 부근의 휘도분포가 가장 높다. 반면 태양의 반대편인 No.115 Patch 부근에서는 가장 낮은 휘도분포를 나타낸다. 태양고도가 비교적 높은 여름철 6월 21일 10:00(AM) 또한 태양이 위치한 No.123 Patch 부근에서 가장 높은 휘도분포를 보이며 태양의 반대편인 No.114 Patch 주변에서 휘도분포가 낮다. 또한, 겨울철 12월 21일 10:00(AM)의 태양고도는 19.31°로 낮지만, 역시 태양이 위치한 No.33 Patch 부근에서 휘도 분포가 높다. 반면, 태양 반대편 천공인 No.133 Patch 부근에서는 휘도분포가 낮은 것으로 분석되었다.

Table 3. Sky luminance distribution of CIE clear sky



4.2 Radiance와의 천공 휘도분포 검증

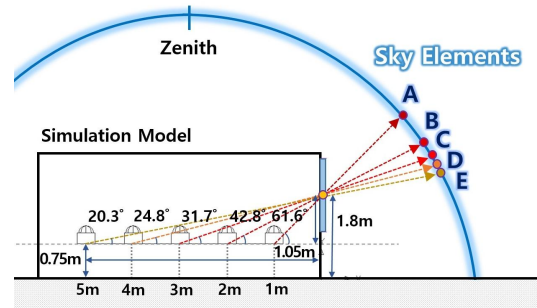


Fig. 6. Concept diagram of sky elements location

Fig. 6은 실내 특정지점에서 바라본 천공 휘도 성분 위치의 다이어그램이다. 천공을 바라보는 위치마다 창의 중앙점을 바라보는 각도가 다르기 때문에 천공을 바라보았을 때의 천공 휘도를 구하기 위해서는 Sky Patches에서의 위치를 파악하는 것이 중요하다. 실내의 측

정위치에서 바라본 측정고도각은 창에서 측정 지점과의 수평거리, 창의 높이를 이용하여 구할 수 있다. 1m, 2m, 3m, 4m, 5m에서 바라본 천공 위치인 A, B, C, D, E지점의 고도는 각각 61.6°, 42.8°, 31.7°, 24.8°, 20.3°이다.

Fig. 7은 Radiance를 통해 비교, 검증할 천공 지점의 고도, 방위각과 계절별 대표일(3.21, 6.21, 9.21, 12.21일)의 태양의 위치를 나타낸 다이어그램이다.

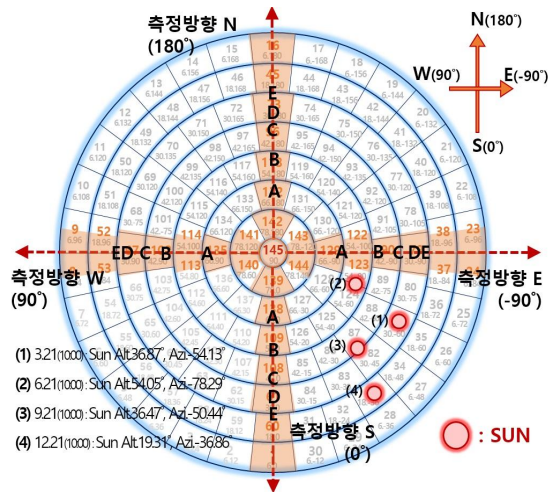


Fig. 7. Measurement direction for the sky patches

본 연구에서는 동, 서, 남, 북 4개 방향의 휘도를 측정하기 때문에 천공 휘도 측정 방향은 각각 -90°, 90°, 0°, 180°이다.

즉, Radiance 프로그램 시뮬레이션 값과의 천공 휘도 검증은 4개의 방향(방위각)과 5개의 천공 측정고도각(A, B, C, D, E)이 나타내는 20개 지점에서 실시하였다.

또한 CIE 표준 청천공의 휘도분포는 태양의 고도각과 방위각이 중요한 변수로 작용하며 이에 따라 변화한다. 따라서 3, 6, 9, 12, 21일(계절별 대표일) 10:00(AM)의 태양의 위치(고도각, 방위각) 변화 또한 고려하였다.

(1) 담천공 시 천공 휘도분포 검증

Table 4는 담천공 시 5개(A, B, C, D, E)의 천공 측정고도각 지점에서 나타나는 천공 휘도의 분포 값을 Radiance 값과 비교한 결과이다.

Table 4. Prediction error rate of sky luminance(CIE overcast sky)

3.21 10:00(AM) Sun Alt:36.87 Azi:-54.13°		A-1m (61.6°)	B-2m (42.8°)	C-3m (31.7°)	D-4m (24.8°)	E-5m (20.3°)
측정 방향 E,W S,N	Radiance [cd/m ²]	2,758	2,362	2,051	1,846	1,709
	Calculation [cd/m ²]	2,794	2,388	2,076	1,862	1,715
오차율		1.3%	1.1%	1.1%	0.9%	0.4%

담천공 시, 천공의 위치가 같은 고도일 때 동, 서, 남, 북 4 방향에서는 같은 휘도값을 갖기 때문에 4 방향에서의 5개(A, B, C, D, E)천공 지점 휘도값이 모두 같다. 본 연구에서 제안한 알고리즘을 이용하여 계산한 천공 휘도 결과와 Radiance 시뮬레이션 값을 비교했을 때 4개 방향 A, B, C, D, E 지점에서 휘도 오차율은 각각 1.3, 1.1, 1.1, 0.9, 0.4%를 나타내어 알고리즘 계산 결과와 Radiance 시뮬레이션 결과값이 유사한 것으로 평가되었다.

(2) 청천공 시 천공 휘도분포 검증

Table 5는 청천공 시 5개(A, B, C, D, E)의 천공 측정 고도각 지점에서 나타나는 천공 휘도 분포 값을 Radiance 값과 비교한 결과이다.

3.21일 10:00(AM) 창이 동향일 때 태양의 위치와 가깝기 때문에 천공 휘도는 약 4,600~8,600cd/m²의 분포를 보이며 다른 방향에 비해 천공 휘도값이 비교적 높다. 본 연구의 알고리즘을 이용하여 계산한 휘도 결과와 Radiance 시뮬레이션 값을 비교했을 때 A~E 지점에서 휘도 오차율은 각각 0.3~1.3%로 유사하다. 창이 서향일 때 천공 휘도값은 약 1,700~3,100 cd/m²의 분포를 보인다. 계산값과 Radiance

시뮬레이션 값의 오차율은 0.9~1.4%로 근접한 값을 나타낸다. 창이 남향일 때는 약 3,500~5,700cd/m²의 천공 휘도 분포를 보이며 계산값과 시뮬레이션 값의 오차율은 0.7~1.5%로 유사하다. 창이 북향일 때 천공 휘도값은 약 1,800~3,000cd/m²이다. 또한 알고리즘 계산 결과와 Radiance 시뮬레이션 결과를 비교했을 때의 오차율은 0.6~1.3%로 두 결과값은 매우 유사한 결과를 나타낸다.

Table 5. Prediction error rate of sky luminance(CIE clear sky)

3.21 10:00(AM) Sun Alt.36.87° Azi.-54.13°		A-1m (61.6°)	B-2m (42.8°)	C-3m (31.7°)	D-4m (24.8°)	E-5m (20.3°)
측정 방향	Radiance [cd/m ²]	4,604	6,861	7,782	8,224	8,602
	Calculation [cd/m ²]	4,665	6,902	7,823	8,281	8,624
	오차율	1.3%	0.6%	0.5%	0.7%	0.3%
측정 방향	Radiance [cd/m ²]	1,719	1,885	2,264	2,685	3,089
	Calculation [cd/m ²]	1,734	1,902	2,295	2,724	3,121
	오차율	0.9%	0.9%	1.4%	1.4%	1.0%
측정 방향	Radiance [cd/m ²]	3,588	4,432	4,875	5,297	5,667
	Calculation [cd/m ²]	3,623	4,472	4,960	5,358	5,706
	오차율	1.0%	0.9%	1.5%	1.1%	0.7%
측정 방향	Radiance [cd/m ²]	1,834	1,949	2,290	2,644	2,996
	Calculation [cd/m ²]	1,848	1,970	2,304	2,679	3,030
	오차율	0.8%	1.1%	0.6%	1.3%	1.1%

Fig. 8에는 Table 4, 5에 나타난 천공별 천공 휘도 계산값과 Radiance 시뮬레이션 값의 비교 결과를 그래프로 나타내었다.

천공 휘도분포 알고리즘 계산결과와 Radiance 시뮬레이션 휘도값을 비교했을 때 오차율은 약 1%이고, R² 값이 0.99로 계산결과와 Radiance 시뮬레이션 값과 매우 일치하는 결과를 보였다. 따라서 제안 알고리즘 사용 시 천공별, 창의 주향 별로 구한 천공 휘도의 예측성은 상당히 정확한 것으로 평가되었다.

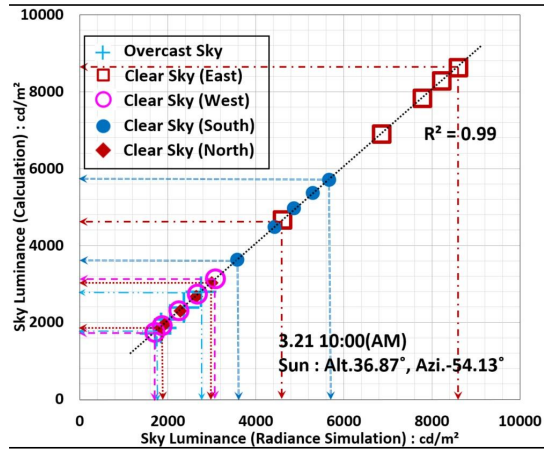


Fig. 8. Simulation and calculated sky luminance

4.3 실내 주광조도 예측 연구와의 연속성

본 연구에서 제안한 알고리즘 사용 시 전문성이 요구되는 천공 평가시설 등이 없이도 간단하게 CIE 표준 천공 휘도를 구현 할 수 있다.

여기서 중요한 점은 실내 주광조도 예측 시 천공의 상태에 대한 평가가 매우 중요하다는 것이다. 실내 주광조도는 천공 확산성분에 큰 영향을 받기 때문에 천공 휘도는 조도 예측에 매우 중요한 Input Parameters로 사용된다.^{1) 10)}

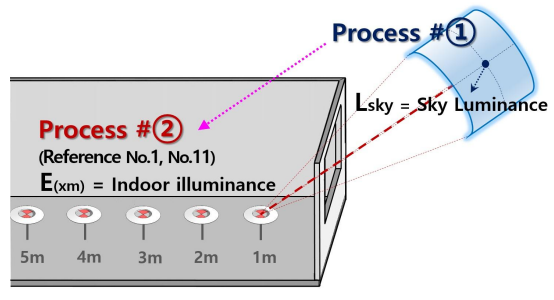


Fig. 9. Prediction indoor illuminance by using sky luminance

따라서 Fig. 9와 같이 천공 휘도 예측은 실내 주광조도의 예측의 연구과 밀접한 연속성을 갖는다. 본 연구에서 예측한 외부 천공 휘도(Process #1)를 실내 주광조도 예측을 주제로 한 기존 선행연구^{1) 10)}의 실내 조도 계산식

에 입력함으로써 다양한 천공 상태에서의 실내 주광조도를 예측(Process #2)할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 천공의 휘도분포에 대한 이론 고찰을 통해 휘도분포 구현 알고리즘을 구축하고, 국제조명위원회 CIE에서 제공하는 표준 천공 모델(CIE overcast sky, CIE clear sky)의 천공 휘도분포를 구현하였다. 이후 Radiance 시뮬레이션 결과와 비교, 검토를 통하여 천공별 휘도분포 계산결과의 유용성을 확보하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) CIE General Sky Model과 이와 관련된 Parameters를 이용하여 구현한 알고리즘을 통해 CIE 표준 천공의 천공 휘도분포 값을 산출할 수 있으며, 이 휘도값을 Sky patches에 적용하면 각 천공(담천공, 청천공)의 천공 휘도분포를 구현할 수 있다.
- (2) 표준 담천공(CIE overcast sky)모델의 천공 휘도분포를 구현한 결과, 천정 휘도가 가장 밝으며 천정(Zenith)과 수평면(Horizon)과의 휘도비는 약 3:1을 나타낸다. 즉, 천정 휘도가 지평면 부근의 휘도의 약 3배 정도 밝은 천공을 나타낸다. 또한 태양의 위치가 변하더라도 휘도분포의 변화는 없으며 천공의 위치가 같은 고도일 때 모든 방위각 방향에서는 같은 천공 휘도값을 갖는다.
- (3) 청천공(CIE clear sky)모델의 천공 휘도 분포를 구현한 결과, 태양 부근에서 천공 휘도가 가장 높고 태양 위치로부터 반대편 90°의 천공에서 가장 낮은 천공 휘도값을 갖는다. 또한 태양의 고도가 높아질수록 태양의 고도가 낮을 때보다 태양 부근에서의 천공 휘도가 작다. 즉, 청천공의 휘도분포는 태양

의 위치(고도각, 방위각)따라 변화하며 이는 휘도 분포의 중요한 변수로 작용 한다.

- (4) 천공 휘도 알고리즘 계산결과와 CIE General Sky Model 및 Perez Sky Model 기반인 Radiance Simulation의 천공 휘도값을 동, 서, 남, 북 4개 방향과 5개의 고도 지점에서 비교한 결과, 담천공 시 0.4~1.3%의 오차율로 평가 되었고 청천공에도 0.3~1.5%의 오차율을 나타내었다. 천공 휘도 알고리즘 사용 시 그 예측성은 시뮬레이션 결과와 비교했을 때 상당히 정확한 것으로 평가되었다.
- (5) 본 연구에서 제안한 알고리즘 사용 시 전문성과 시간 및 비용의 제약이 있는 천공 평가 시설 등이 없이도 간단하게 CIE 표준 천공 휘도를 구현할 수 있으며 또한 이렇게 구해진 외부 천공 휘도는 천공 확산 성분에 큰 영향을 받는 실내 주광조도 예측에 매우 중요한 Input Parameters로 사용할 수 있다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (NRF-2013R1A1A2A10005456)

Reference

1. Yoon, K. C, Yun, S. I, Kim, S. S, Kim, K. S, Application of Simplified Daylight Prediction Method for Daylighting Performance Evaluation on Overcast Sky, The Korean Solar Energy Society, 34(5), pp.1-9, 2014.
2. Yoon, K. C, Kim, K. S, Predicting Daylight Illuminances on Vertical Surfaces Using Luminous Efficacy of Solar Irradiance, The Korean Solar Energy Society, 34(1), pp.19-27, 2014.
3. CIE Standard 011/E:2003, Spatial Distribution

- of Daylight - CIE Standard General Sky. pp.1-7, 2004.
4. Gregory J. Ward, The RADIANCE Lighting Simulation and Rendering System. Lighting Group Building Technologies Program Lawrence Berkeley Laboratory, pp.1-23, 1994.
 5. R. Kittler, S. Darula. The Simultaneous Occurrence and Relationship of Sunlight and Skylight under ISO/CIE Standard Sky Types, Lighting Research and Technology, Vol. 47, pp.565-580, 2014.
 6. Danny. H. W. Li. Chris C. S. Lau, Joseph C. Lam. Overcast Sky Conditions and Luminance Distribution in Hong Kong, Building and Environment, 39(1), pp.101-108, 2004.
 7. Norio Igawa, Yasuko Koga, Tomoko Matsuzawa, Hiroshi Nakamura, Models of Sky Radiance Distribution and Sky Luminance Distribution, Solar Energy, 77, pp.137-157, 2004.
 8. Surapong Chirarattananon, Pipat Chaiwiwatworakul, Distributions of Sky Luminance and Radiance of North Bangkok Under Standard Distributions. Renewable Energy, 32(8), pp.1328-1345. 2007.
 9. R. Kittler, S. Darula. The Method of Aperture Meridians: a Simple Calculation Tool for Applying the ISO/CIE Standard General Sky. Lighting Research and Technology, 38(2), pp.109-122, 2006.
 10. Eero Vartiainen. Daylight Modelling with the Simulation Tool DeLight. Helsinki University of Technology Publications in Engineering Physics. 2000.
 11. Tsiopoulou Chamaidi, Calibrated Sky Luminance Maps for Daylight Simulation, Technical University Vienna -Continuing Education Center, Austria, 2006.
 12. R. Perez, R. Seals, J. Michalsky. All-Weather Model For Sky Luminance Distribution - Preliminary Configuration and Validation, Solar Energy, 50(3), 1993.