

몬테카를로 시뮬레이션을 적용한 다면 실내공간내의 조도계산에 관한 연구

A STUDY ON CALCULATION OF ILLUMINANCE DISTRIBUTION IN COMPLEX INTERIOR USING MONTE CARLO SIMULATION

김 희철* 김 훈 지 철근
KIM, H. C KIM, H CHEE, C. K

서울대학교 대학원 전기공학과
Dept. of Electrical Eng. Seoul National University

ABSTRACT

In this paper, The Monte Carlo Simulation is performed in complex geometries which are composed of obstacles intercepted path of photon. Light is assumed to be particle and has particular direction and weighting value. The illuminance distribution is calculated proportional to the summation of weighting values striking area element. The result of simulation is consistent with that of experiments in a few error.

1. 서 론

실내조명을 설계하는 단계에서 실내면의 조도 분포를 예측하는 것은 매우 중요하다. 실내조명은 단순히 밝은 조명환경을 제공하는 것 뿐 아니라, 적절한 밝기의 분포, 눈부심의 제거 등을 고려하여 종합적으로 평가되어야 한다.

따라서 실내면에서 조도의 분포를 아는 것이 필수적으로 요구되나, 종래의 실내조도 계산법은, 표준적인 계수들을 이용하여 전체 실내조도의 평균치만을 계산하므로 정확한 조도분포를 알아내기가 원리적으로 불가능하다. 특히 실내면이 복잡한 다면 공간일 경우 조도분포의 예측이 더욱 어려워진다.

본 논문에서는 다면 실내공간에서 광원의 위치, 배광분포, 벽면의 반사율등을 고려하여 실내면의 조도분포를 Monte Carlo Simulation으로 계산하는 방법을 제안하고자 한다.

2. 이론

2.1 기본 원리

실내조도 계산을 위한 몬테카를로 시뮬레이션의 근본은 광원에서 방출된 빛을 수많은 입자들로 구성된 것으로 보고, 각 입자들의 진행경로를 흡수될 때까지 추적하는 것이다. 최종적인 조도분포는 실내면의 모든 점들에 대하여 이들 입자들이 진행경로 중에서 부딪힌 횟수를 계산함으로써 알 수 있게 된다.

최초 광원에서 임의의 방향으로 방출된 빛의 입자는 계속 직진하다가 경로중에 있는 실내면의 어느 점에 충돌하게 된다. 충돌한 빛은 실내면의 반사특성에 따라 반사, 또는 흡수되며, 반사할 경우 또 다시 어떠한 경로를 따라 직진하여 다른 점에 충돌하는 과정을 반복하게 된다.

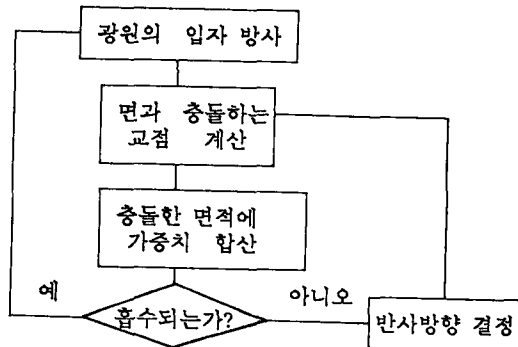


그림 1. 기본 흐름도
Fig. 1. Fundamental Flow chart

2.2 광원의 방사 특성

(1) 점광원에서의 방사

균일한 배광분포를 가지는 점광원의 경우 θ, ϕ 방향의 미소면적으로 방사되는 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

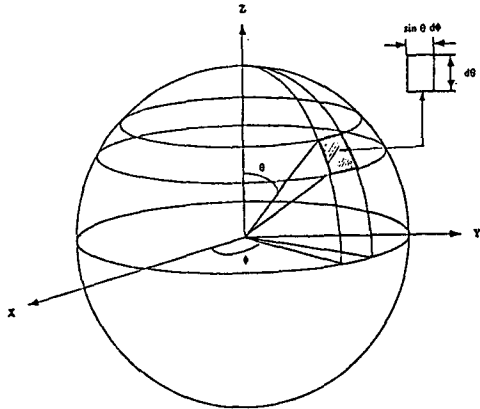


그림 2. 점광원의 방사
Fig. 2. Emission of a point source

$\theta = \theta_0$ 까지의 누적확률은

$$\int_0^{\theta_0} \frac{\sin \theta}{2} d\theta = \frac{1 - \cos \theta_0}{2} = R$$

로 되며 따라서

$$\theta_0 = \cos^{-1}(1 - 2R) \quad \dots\dots(1)$$

R : 난수

만약 광원이 천장에 부착되어 있는 경우라면

$$\theta_0 = \cos^{-1}(1 - R) \quad \dots\dots(2)$$

이다. 또한 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi_0 = 2\pi R_2 \quad \dots\dots(3)$$

(2) 실제의 광원의 특성

실제의 광원은 θ, ϕ 방향으로 매우 복잡한 형태를 가지는 배광분포이다. 이런 경우 빛의 방사는 점광원과 같이 가정하고, 각 입자는 배광곡선의 형태에 따른 가중치를 가지고 방사한다고 볼 수 있다.

2.3 반사특성

면에서의 반사는 완전확산반사와 정반사의 합으로 나타난다. 완전확산반사를 하는 경우 반사광의 분포는 그림 3과 식 (4)와 같다.

$$\alpha = \cos^{-1}(R_1) \quad \dots\dots(4)$$

$$\beta = 2\pi R_2$$

여기서 R_1, R_2 는 난수이다.

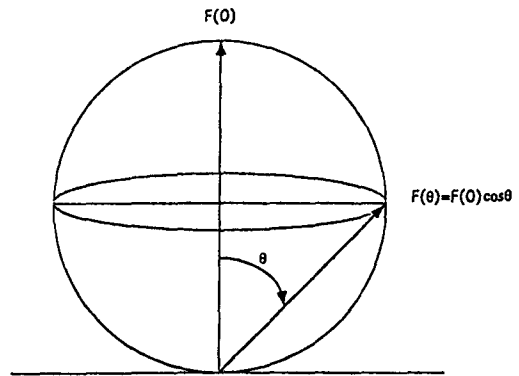


그림 3. 완전확산반사
Fig. 3. Perfect diffusing reflection

2.4 입자 진행 경로

(1) 입자의 출발

공간내의 입자가 원래 위치 (X_0, Y_0, Z_0)에서 출발하여 새로운 위치 (X_i, Y_i, Z_i)로 이동하는 경우, 입자의 방향을 두 각 α, β 로 결정할 수 있다. 그리고 방향코사인은 식 (5)가 된다.

$$\begin{aligned} C_x &= \sin \alpha \cos \beta \\ C_y &= \sin \alpha \sin \beta \\ C_z &= \cos \alpha \end{aligned} \quad \dots\dots(5)$$

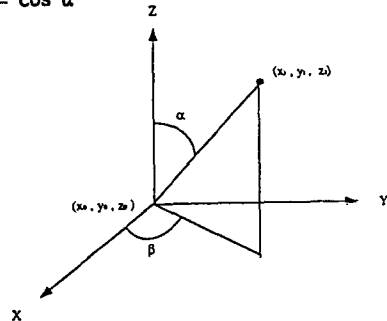


그림 4. 두 점과 각도 표시
Fig. 4. Two points and angles

(2) 면에서 입자의 충돌

공간내에서 평면은 원점에서 평면까지의 거리 D와 수직 벡터로 표시 할 수 있다. 평면 위의 한 점을 X_a, Y_a, Z_a 라고 할 때 원점에서 면까지의 거리 D는

$$D = X_a dx + Y_a dy + Z_a dz$$

로 계산된다. 평면의 벡터 방향이 원점을 향하고 있으면 D는 음의 값이 된다.

점에서 출발한 입자는 평면과 만나게 되며 두 점 사이의 거리 r은 다음 식 (6) 과 같다.

$$r = \frac{D - (dxX_0 + dyY_0 + dzZ_0)}{C_x dx + C_y dy + C_z dz} \dots (6)$$

여기서 r의 값이 양 일때 점에서 출발한 직선이 평면을 향한다. 만나는 면이 여러개인 경우 교점들의 거리를 비교하여 가장 가까운 점을 교점으로 계산한다.

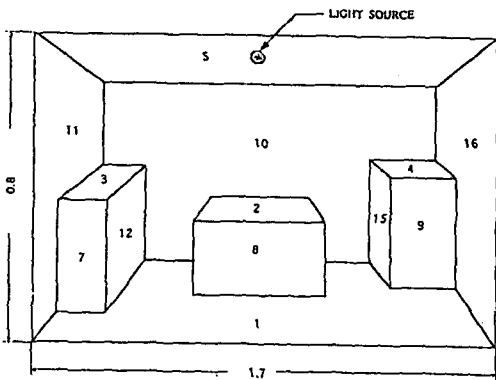


그림 5. 실내공간의 구조
Fig. 5. Interior room structure

(3) 좌표축의 회전

평면에 충돌한 입자가 반사하여 새로운 방향으로 진행할 때, 원래의 좌표계보다는 충돌면에 대응하는 새로운 좌표계를 이용하여 α, β 를 결정하는 것이 편리하다. 새로운 좌표계가 원래의 좌표계를 Z축에 대하여 ϕ , Y축에 대하여 θ 만큼 회전시켜 얻어졌을 경우 방향코사인의 관계는 (7) 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\phi & -\sin\theta \cos\phi \\ \cos\theta \sin\phi & \sin\theta \sin\phi \\ -\sin\theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_x' \\ C_y' \\ C_z' \end{bmatrix} \dots (7)$$

다음의 표 1은 평면의 벡터에 따라 좌표축을 회전한 값들이다.

면 번호	θ	ϕ	dx	dy	dz
1,2,3,4	0	0	0	0	1
5	π	0	0	0	-1
6	$-\pi/2$	$-\pi/2$	0	1	0
7,8,9,10	$\pi/2$	$-\pi/2$	0	-1	0
11,12,14	$\pi/2$	0	1	0	0
13,15,16	$-\pi/2$	0	-1	0	0

표 1. 실내면에 대한 값들

Table 1. Values for surface of room

2.5 조도의 계산

각 미소면적의 조도는 다음의 (8)식으로 계산된다.

$$Lux = \frac{F W}{A W_t} \dots (8)$$

여기서

- F : 광원의 방사광속
- W : 미소면적에 충돌한 가중치의 합계
- W_t : 전체 방사입자의 가중치의 합계
- A : 미소면적의 넓이

3. 측정

3.1 배광 분포의 측정

광원의 중심에서 일정한 반경으로 θ, ϕ 를 변화 시키면서 그 방향의 광도를 측정 할 수 있다. 광도의 측정은 배광곡선 측정 장치에 조도계를 부착하여 조도를 구하고 거리의 역자승의 법칙으로 광도 I를 구한다. $\phi = 0$ 일때 광원의 배광곡선은 그림 5 와 같이 나타난다. 전체 ϕ 에 따른 광원의 등광도도는 그림 7 에 나타내었다.

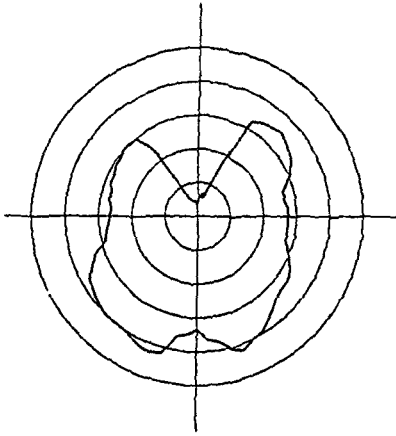


그림 6. 광원의 배광곡선
Fig. 6. Light distribution curve of Light source

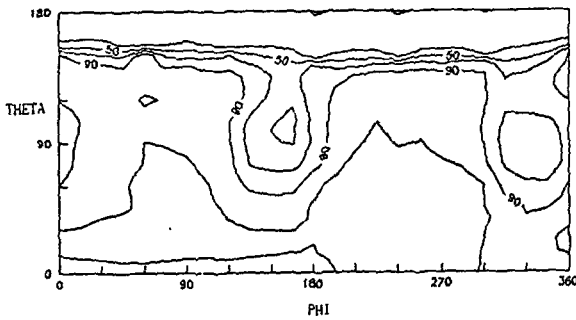


그림 7. 광원의 등광도도
fig. 7. Iso-candela diagram

강도 분포를 구하여 모든 방향으로 적분을 하면 광원의 총광속이 식 (9)으로 구해진다.

$$F = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \, d\phi \dots (9)$$

그리고 광원의 특성은 다음과 같다.

광 원	백열전구 110V 100W
배광분포	전반 확산
강 도	7 - 132 [cd]
총광속	1148 [lm]
발광부 길이	2 cm

표 2. 광원의 특성
Table 2. specifications of the light source

3.2 반사율의 측정

실험에 사용된 공간에서 각 평면의 반사율은 다음의 표 3과 같다.

종 류	반사율	특 성	사 용 면
흰 색	0.81	확 산	2, 8, 13, 14
갈 색	0.44	확 산	4, 5, 6, 9, 10 11, 15, 16
회 색	0.22	확 산	1
검은색	0.1	확 산	3, 7, 12

표 3. 실내면 반사율
Table 3. Reflectance value of room surfaces

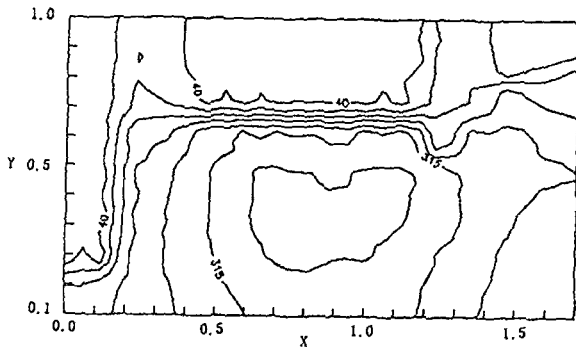
4. 결과 및 검토

4.1 조도 분포의 시뮬레이션 결과

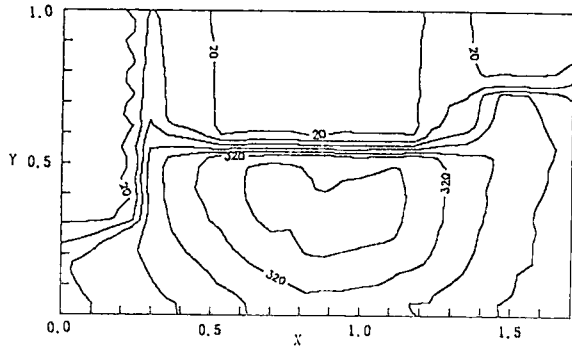
조도의 분포의 측정은 가로 1.7 m, 세로 1.0 m 높이 0.8 m 의 구조를 가진 모델공간에서 실시하였다. 평면 1에 대해서 계산치가 어떠한 값을 갖게 되는가 예측해 보았고 측정치와 계산치를 같은 좌표에서 그 값을 비교하였다. 계산값과 측정값의 최대, 최소, 오차를 표 4에 나타내었다.

구 분	측정치	계산치	오 차	전체비교
최 대	394.9	407	3.1 %	417
최 소	64.5	52	19.4 %	26
평 균	271.8	271.4	0.2 %	244.4

표 4. 조도의 비교
Table 4. The comparison of illumination



(A) 측정



(B) 계산

그림 8. 평면 1의 등조도 곡선
Fig. 8. Iso-lux diagram of plane 1

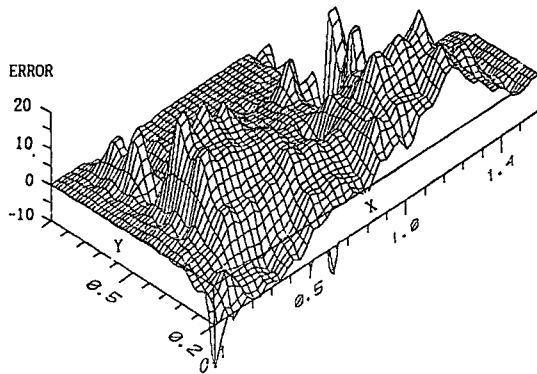


그림 9. 오차의 3차원 표시
Fig. 9. 3-D distribution of error

4.2 검토

표 4에서 나타난 바와 같이 최대값의 경우 계산치가 더욱 큰 것을 알 수 있고 최소값의 경우 그 반대로 계산치가 작게 나타난다. 즉 계산값의 결과가 더욱 넓게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 이는 실내공간의 크기와 비교할 때 광원의 크기를 무시할 수 없기 때문이다.

시뮬레이션의 전체 평균이 측정치보다 매우 작게 나타나는 것은 조도계의 크기 때문에 구석진 곳의 조도측정을 할 수 없기 때문이다. 그래서 같은 위치에서 평균치를 구해 본 결과 계산치와 측정치는 거의 일치하였다.

평면 1에 대한 조도분포는 그림 6의 등조도곡선 (a)와 (b)와 같이 매우 유사한 형태를 가짐을 알 수 있다. 다른 평면에 대해서도 유사한 형태의 등조도분포가 나타났다.

그리고 오차의 분포는 그림 9에 나타내었다.

5. 결론

이상과 같이 복잡한 다면 실내공간에서 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 조도분포를 계산하였다. 이 시뮬레이션은 실제의 측정한 조도분포와 거의 유사하고 평균치도 거의 일치하여 신뢰성 있는 결과를 제시해준다. 특히 실내의 크기가 광원의 크기에 비해 충분히 큰 경우 시뮬레이션의 결과는 더욱 정확해질 것이다.

그러나 더욱 실용적으로 사용하기 위해서는 조도분포의 결과를 3차원 그래픽으로 나타낼 필요가 있으며 반사율이나 배경분포도 측정하기가 어려우므로 분류별로 나누어 데이터베이스에 기록해 놓는 것이 바람직할 것이다.

참고 문헌

- (1) 지철근, 전기응용, 문운당, 1987
- (2) 김 훈, " 몬테카를로법을 이용한 실내조도 계산 ", 연구보고서, 1992
- (3) 송 민호, " Monte Carlo Simulation을 이용한 채광창을 가지는 실내면의 조도계산에 관한 연구 ", 석사학위논문, 서울대학교, 1992
- (4) P.R. Tregenza, " The Monte Carlo method in lighting calculations", *Lighting Research & Technology*, Vol.15, No.4, 1983
- (5) M. Nagata, " Calculation of illuminance distribution in the concave interior with a partition by the Monte Carlo simulation", *Trans. IEE, Japan*, Vol.108, p47, 1988
- (6) M. Nagata, " Calculation of illuminance in concave interior by the Monte Carlo simulation ", *J. Illum. Engng. Inst. Jpn.*, Vol. 72, No.10, 1987
- (7) J.E. Kaufman, ed., *IES Lighting Handbook: Reference Volume*, IESNA, 1984, New York