螢光燈을 사용하는 室內의 照度分布 豫測을 위한 數値모델 開發

Developing a Numerical Model to Estimate Illuminance Distribution for Rooms with Fluorescent Luminaires

송 규 동* 이 정 호** 유 기 형***
Song, Kyoo-Dong Lee, Jung-Ho Yu, Ki-Hyeung

Abstract

Recently, Task and Ambient Lighting(TAL) gained its popularity as a lighting system in many office buildings in which the workstations are usually divided by interior partitions. The luminaires are equipped with various kinds of reflectors and louvers to reduce glare. The interior partitions and luminaires with louvers make it difficult to accurately predict illuminance distributions by the conventional prediction methods such as point-by-point method and split flux method.

This study was performed to develop a numerical model which can accurately estimate the illuminance by fluorescent luminaires with various reflectors and louvers for the modern office environment. The numerical model was developed based upon the Monte Carlo methods and Ray-tracing technique. Then, the accuracy of the numerical model was validated through measurements in an actual room and a physical scale model room.

키워드: 형광등, 인공조명, 몬테카를로 방법, 광선추적기법, 실내조도계산, 기하학적형상, 광학적 거동
Keywords: Fluorescent Luminaire, Artificial Lighting, Monte Carlo Method, Ray-tracing Technique, Illuminance Estimation, Geometrical Configurations, Optical Behaviors

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

현대 건축물의 조명설계에서 자연채광의 효과를 고려하여 인공조명을 설계하기 위해서는 인공조명기구를 점멸(on/off)또는 조광(dimming)제어 했을 때의 조도 분포를 정확히 파악하는 것이 필요하다. 실내조도의 정확한 계산을 위해서는 수조면에 입사하는 빛을 직접조도와 간접조도로 분리하여 계산할 필요가 있다. 여기서 직접조도란 조명기구에서 발산된 빛이 직접 입사하는 성분을 말하고 간접조도란 조명기구의 반사갓, 천장이나 바닥, 벽 등에서 반사된 후 들어오는 성분을 말한다.

기존의 인공조명기구에 의한 실내 작업면의 조도를 계산하는 방법으로는 조명기구의 배광분포 곡선에서 임의의 방향으로의 광도를 읽어낸 다음 조도 계산점에서의 조명기구의 형태계수를 계산하여 광원에서 직접 입사하는 조도 성분을 계산하는 축점법(point-by-point method)이 있다(**渡邊要**, 1975).

간접조도의 성분은 실을 작업면에 따라 상하로 분리하여 계산하는 분리광속법(split flux method)으로 계산한다. 이 방법은 절단면의 안쪽 면에 최초로 입사하는 광속과 각 면의 등가반사율에 의해 작업면 전체에 대한 간접조도의 평균치를 계산하는 것이다.

하지만 현대식 사무소건물에서는 칸막이에 의해 개인작업영역을 구획하고 조명방식도 이에 따른 TAL(Task and Ambient Lighting:국부전반조명방식)의 도입이 증가하고 있으며, 눈부심을 줄이기 위해서 다양한 반사갓의 형태와 재료에 의해 면처리된 광원의 사용이 증가하고 있으므로 기존의 축점법과 분리광속법에 의해 작업면의 조도를 정확하게 계산할 수 없게 된다.

좀더 진보된 계산방법으로서는 광속전달법(Luminous Flux Method)이 있다. 이 방법은 실내의 면을 다수의 미소면으로 나누어 미소면 사이의 광속전달량을 계산함으로써 실내의 상호반사성분 즉, 간접조도를 좀더 정확하게 계산할 수 있다. 그러나 이 방법은 기본적으로 실내의 모든면이 완전확산면(Lambertian surface)일 경우에 적용할 수 있지만 형광등의 반사갓처럼 경면반사 또는 혼합반사면에 적용할 경우 정확성이 낮아지게 되는 한계점을 가지고 있다.

근래 들어 컴퓨터의 용량과 계산속도가 급속히 커지고

* 정회원, 한양대 건축공학과 교수, Ph. D.
** 정회원, 한양대 대학원, 석사과정
*** 정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구원

이 논문은 건설교통부 97 건설기술연구개발사업 연구비에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분에게 감사드립니다.

빨라지면서 몬테카를로 방법과 광선추적 기법에 의해 빛의 물리적·광학적 특성을 모델링하여 실내조도의 계산이 가능해졌다. 몬테카를로 시뮬레이션 방법(Monte Carlo Simulation:이하 MCS)은 난수를 발생시켜 다양한 공학적 문제에 대한 해를 찾는 방법으로서 1983년에 미국의 Tregenza(1983)가 MCS를 이용한 실내조도계산법에 관한 이론을 발표하였다. 상업적으로도 몬테카를로 방법을 이용한 많은 조명설계용도구가 개발되고 있다. 국내에서도 이미 인공조명 분야에서 MCS를 이용하는 실내면의 조도계산법에 대한 연구가 발표되었다(김훈, 1992). 이 연구에서는 광원으로부터 방사되는 광자를 배광분포에 따른 가중치를 가지고 진행하는 입자로 가정하여 시뮬레이션을 하고 있기 때문에 배광분포를 조명기구별로 일일이 측정하여 데이터베이스화 해야 하는 어려움이 있었다.

특히 다양한 반사판과 루버가 부착된 형광등과 같이 루버의 크기나 반사율의 변화에 따른 배광특성의 변화를 데이베이스터로 만드는 것은 어렵고 까다로운 작업이다. 또한 여러 개의 형광전구가 설치된 형광등기구에서 조광제어를 위해 일부의 형광전구만을 점멸하였을 경우의 배광분포도 측정에 의존해야 하는 문제점이 있다.

이러한 문제점은 최근 형광등에 장착된 루버의 크기와 반사율의 영향에 따른 조도비와 현휘제어와의 관계를 밝히는 연구(Chen, 1998)를 통해 광원의 형상을 모델링함으로써 해결되었다. 그러나, 이 연구의 경우 광원이 수평하게 직각방향(x, y 방향)으로 설치되는 경우에 대해서만 시뮬레이션이 가능하도록 되어 있기 때문에 형광등이 다양한 위치에 다양한 방향으로 배치되는 실내에 적용하기 위한 조도계산 수치모델로서는 부족한 점이 있었다.

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 사무소건물의 조명에 가장 많이 사용되고 있는 형광등이 임의의 방향, 임의의 위치에 설치되거나 다양한 반사갓을 갖고 있고 실내에 칸막이 등의 장애물이 존재하여도 실내 임의의 작업면 조도를 정확하게 계산할 수 있는 수치모델을 개발하는 것이다.

1.3 연구의 범위 및 방법

본 연구에서 개발한 수치모델은 사무소건물에서 일반적으로 많이 채용하고 있는 형광등을 대상광원으로 하였다. 연구는 문헌에 의한 이론의 정립, 수치모델 개발, 그리고 실제의 방과 축소모형실험을 통한 수치모델의 정확성을 검증하는 순서로 진행되었다.

이론 정립을 위한 연구로는 실내조도계산 이론 연구, 기하학과 벡터학을 중심으로 형광등의 기하학적 형상의 모델링 연구, 그리고 몬테카를로 방법(Monte Carlo Method)과 광선추적기법(Ray-tracing Technique) 이론을 바탕으로 광자의 광학적 거동에 관한 알고리듬을 연구하였다.

기하학적 형상과 광학적 거동의 이론의 정립을 통하여 형광등에 의한 조도를 계산하는 수치모델을 개발하였고 실제의 방과 축소모형 실험 결과와의 비교를 통하여 수치모델의 정확성을 검증하였다. 실제의 방에서의 측정에서는 칸막이의 유무에 의한 영향을 비교·검토하였고, 축소모형 실험에서는 주로 형광등의 하부에 부착하는 루버의 유무, 점등광원의 위치, 그리고 실내표면 반사율의 변화에 따른 조도 분포의 변화를 비교·검토하였다. 그림1은 본 연구의 전체 흐름도를 나타낸 것이다.

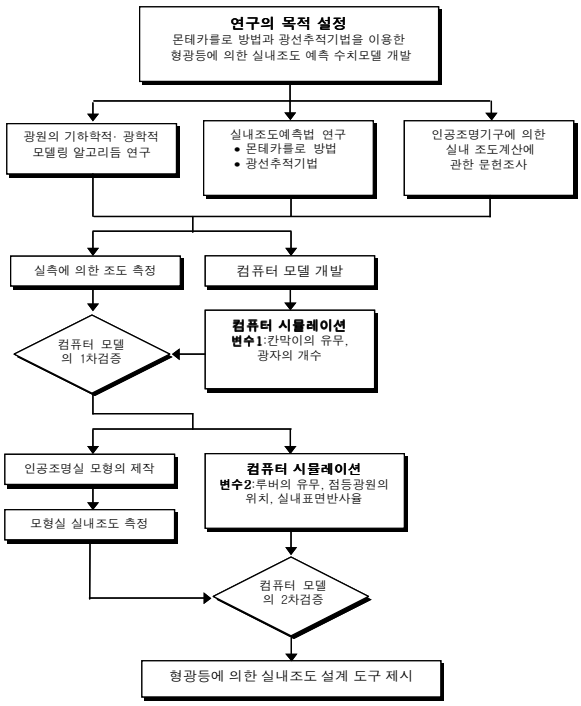


그림1. 연구의 흐름도

2. 기본이론의 고찰

2.1 몬테카를로 방법

통계적 확률이론에 기반을 둔 기술로서 난수(random number)를 발생시킨 후에 각 과정을 시뮬레이션하여 원하는 값의 확률적 분포를 알아내는 방법이다(김재삼, 1997). 난수발생 과정이 결과나 거동에 직접적으로 관련이 있는지 없는지에 따라 결정론 또는 확률론으로 구분된다. 조도계산을 위한 몬테카를로 방법은 결정론이다. 이 방법을 적용하여 실내조도를 계산할 때 광원면 위에서 광자를 발생시키는 위치와 방사 방향은 난수의 발생에 의해 결정된다(유기형, 1997).

2.2 광선추적기법

광자의 반사, 투과, 흡수 그리고 굴절과 같은 복잡한 광학적 특성을 표현할 수 있도록 광자가 운동하는 방향과 크기를 벡터화 시키고 각 입자들의 진행경로를 입자가 소멸될 때까지 추적하는 방법이다. 광자의 방향은 반사면의 확률분포(probability distribution)에 따라 난수에 의해 결정된다. 방사된 광자는 공간 내에서 직진을 하다가 면에 도달하고 흡수 또는 반사될 것인지가 결정된다. 광자가 표면 또는 광원에 흡수되면 다음의 광자가 광원

에서 방사된다. 이러한 계산 절차는 계산초기에 정해 놓은 발생 광자수만큼 반복되고 결과적으로 임의의 면에서의 조도는 그 면에 입사하는 광자의 수에 따라서 결정된다.

2.3 광자의 발생 원리

형광전구의 경우 형광전구의 내면에 칠해져 있는 형광물질은 완전 확산 투과물질이므로 형광전구의 표면에서 광자는 모든 방향으로 똑같은 확률을 갖고 방사된다. 이때 방위각(ϕ)은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = 2\pi R \tag{1}$$

단, R: 난수

그림2에 보인 것과 같이 빛이 입사하는 입사각과 같은 개념으로 광원면에서 수직으로 방사하는 광자의 확률분포를 $F(0)$라고 할 때 $F(\theta)$의 방사각은 식(2)와 같이 정의될 수 있다(Chen, 1998).

$$F(\theta) = F(0)\cos\theta \tag{2}$$

3차원적으로 볼 때 그림3과 같이 형광전구의 임의의 위치에서의 광자의 방사확률분포함수는 방사각(θ)와 방위각(ϕ)를 사용하여 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$F(\theta,\phi) = F(0)\cos\theta d\omega \tag{3}$$

이 식은 다시 식(4), 식(5) 및 식(6)으로 변형될 수 있다.

$$\int_0^{\pi/2} F(0)\cos\theta\sin\theta d\theta = 1 \tag{4}$$

$$F(\theta)d\theta = \frac{2\pi F(0)\cos\theta d\theta}{\int_0^{2\pi} 2\pi F(0)\cos\theta d\theta} 2\cos\theta\sin\theta d\theta \tag{5}$$

$$\int_0^{\theta} 2\cos\theta\sin\theta d\theta = \frac{1-\cos 2\,\theta_0}{2} = R \tag{6}$$

여기서 방사각(θ)은 식(7)로 계산할 수 있다.

$$\theta = \frac{\cos^{-1}(1-2R)}{2} \tag{7}$$

3. 수치모델의 개발

3.1 수치모델의 개요

본 연구에서 개발된 수치모델은 그림4와 같이 입력모듈, 계산모듈, 출력모듈로 구성되어 있다. 그림5는 몬테카를로 방법과 광선추적기법을 적용하여 임의의 면에서 조도를 계산하는 핵심 알고리듬을 보인 것이다.

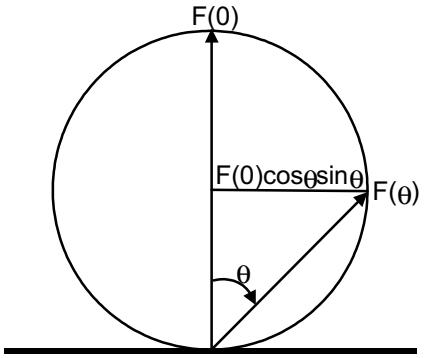


그림2. 광자의 방사각 F(θ)

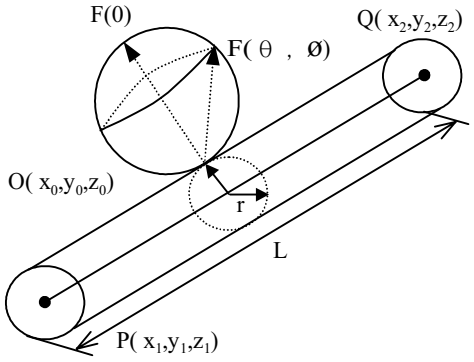


그림3. 광원면에서 광자의 방사방향(θ , ϕ)

시뮬레이션의 과정은 다음과 같다. 우선 시뮬레이션의 수행을 위한 광자의 총개수를 결정한다. 그리고 출력광속(lm)을 광자의 총개수로 나누면 광자 한 개가 갖는 광속이 결정된다. 광자의 개수와 광자의 세기가 결정되면 광원의 형상 범위 내에서 난수를 이용하여 발생위치를 결정하고 광자를 발생시킨다.

발생된 광자에 대해서 광자와 평면이 만날 조건 또는 광자와 광원이 만날 조건을 검사하게 되고 만약 계산 대상 평면에 광자가 입사하지 않고 소멸되면 광원에서 다음 광자를 발생시킨다. 하나의 광원에서 지정된 개수의 광자가 모두 방사되면 다음의 광원에서 같은 방법으로 광자를 발생시키고 모든 광원에서 광자가 발생하고 나면 각 계산 대상면의 조도는 식(8)로 계산한다(Chen, et al., 1998).

$$E = \frac{F}{P_{total}} \cdot \frac{P_n}{A} \tag{8}$$

단, E: 조도 [lx]

F: 광원의 방사 광속 [lm]

P_{total}: 전체 방사 광자수

P_n: 계산 대상면으로의 입사 광자수

A: 계산 대상면의 면적 [m^2]

3.2 기하학적 형상의 모델링

형광전구의 기하학적 형상은 원통형으로서 형광전구 표면에서 광자가 방사되는 점의 위치는 형광전구의 반지름(r)과 각도(θ)를 이용해 원주좌표계로 나타내야 한다. 원주좌표계는 그림6과 같이 나타낼 수 있다.

점 P의 직교좌표(x, y, z)와 원통좌표(r, θ, z) 사이에는 식(9)가 성립한다(백용배 외 1인, 1996).

$$\begin{pmatrix} x = r\cos\theta \\ y = r\sin\theta \\ z = z \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} r^2 = x^2 + y^2 \\ \theta = \tan^{-1}\frac{y}{x} \end{pmatrix} \tag{9}$$

원주면은 고정된 벡터의 방향으로 이것과 수직인 면 위의 원이 움직이면서 만들어지는 곡면이다. 본 연구에서는 광원이 공간상에 임의의 방향을 갖고 있어도 광자를 발생시키도록 원주의 양끝 점을 벡터로 하는 직선 위를 움직이는 원의 방정식을 사용하여 광원의 형상을 정의하였다. 수치모델에 적용되는 원주의 방정식은 다음과 같은 방법으로 구해질 수 있다.

원좌표계의 축을 x, y, z로 놓고 새로운 좌표계의 축을 x′, y′, z′라고 하고 임의의 벡터에 대하여 x′, y′ 및 z′의 방향여현을 구해야 한다.

x′의 방향여현을 $[lx, mx, nx]$, y′의 방향여현을 $[ly, my, ny]$, 그리고 z′의 방향여현을 $[lz, mz, nz]$라 정의하고 벡터를 A[a, b, c]라고 했을 때 z′의 방향여현은 [-a, -b, c]가 되고 x′와 y′의 방향여현은 다음의 조건식(10), (11), (12)를 가지고 도출해낼 수 있다.

조건식 1: $lx^2 + mx^2 + nx^2 = 1$ (10)

조건식 2: $lx \cdot lz + mx \cdot mz + nx \cdot nz = 0$ (11)

조건식 3: $-mz \cdot lx + lz \cdot mx + mz = 0$ (12)

위의 조건식으로 x′의 방향여현을 구하고 x′와 z′의 외적으로 y′를 구한다. 새로운 좌표의 방향여현이 구해지면 좌표변환에 의해 원주의 식(13)을 구하고 정리하면 2차곡면의 일반형 방정식(14)의 형태로 나타내어 질 수 있다.

표1은 원주의 일반형 방정식(14)가 갖는 각 계수의 계산식이다.

$$(x \cdot lx + y \cdot mx + z \cdot nx)^2 + [x(mz \cdot nx - nz \cdot mx) + y(nz \cdot lx - lz \cdot nx) + z(lz \cdot mx - mz \cdot lx)]^2 = r^2 \tag{13}$$

$$A x^2 + B y^2 + C z^2 + Dxy + Exz + Fyz + Gx + Hy + Iz + J = 0 \tag{14}$$

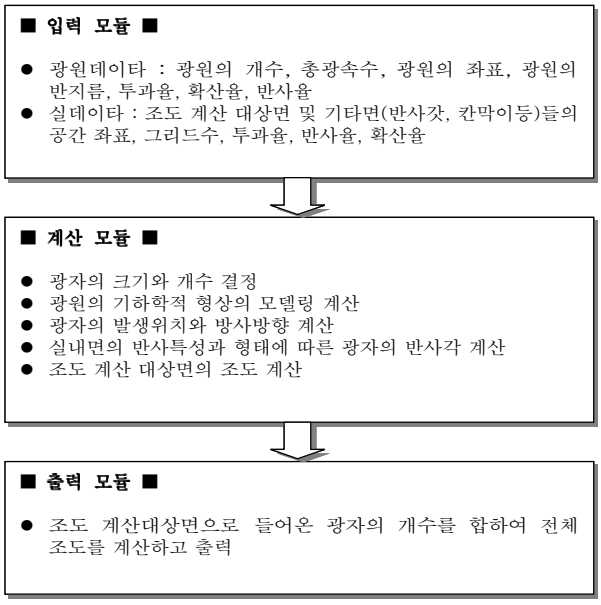


그림4. 수치모델의 구성모듈

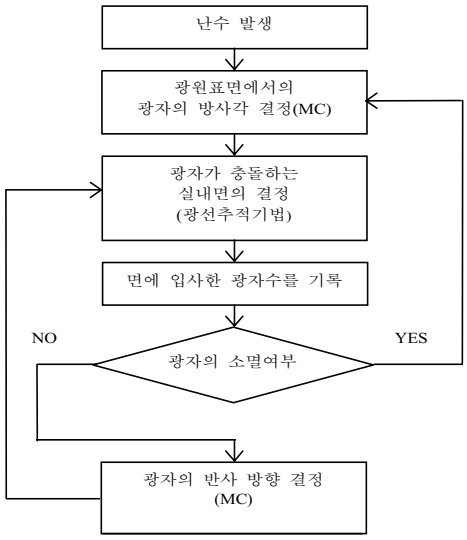


그림5. MCS와 광선추적기법을 이용한 조도계산의 핵심 알고리듬

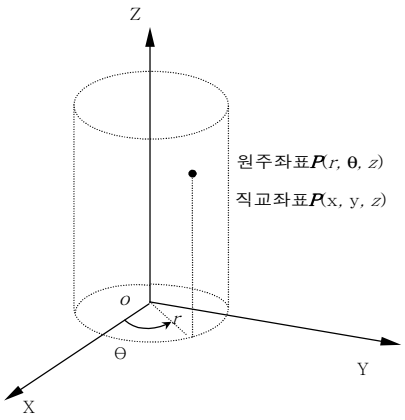


그림6. 원주 좌표계

3.3 광학적 거동의 모델링

형광전구에서 방사된 광자가 형광등의 반사갓이나 실내의 임의의 표면에 입사한 다음 반사되는 것을 모델링하기 위해서는 광자의 움직임을 벡터화시켜야 한다.

광자의 위치를 *X, Y, Z*를 축으로 하는 직교좌표계에서 표시하면 원래의 위치 $O(x_0, y_0, z_0)$에서 새로운 위치 $P(x_1, y_1, z_1)$로 이동하는 경우, 입자의 방향은 방사각과 방위각으로 결정할 수 있다(그림7 참조). 각 축의 방향코사인은 식(15)와 같다.

$$\begin{pmatrix} Vx=\sin\theta\cos\phi \\ Vy=\sin\theta\sin\phi \\ Vz=\cos\theta \end{pmatrix} \tag{15}$$

교점과 평면이 만나는 직선의 방정식을 식(16)으로 변형하고 식(17)에 대입하여 t값을 구한다. 그리고 t값을 다시 직선의 방정식에 대입하여 교점의 좌표(x_1, y_1, z_1)를 식(18)로부터 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x_1 = x_0 + V_x t \\ y_1 = y_0 + V_y t \\ z_1 = z_0 + V_z t \end{pmatrix} \tag{16}$$

$$Ax+By+Cz+D=0 \tag{17}$$

$$\frac{x-x_1}{l}=\frac{y-y_1}{m}=\frac{z-z_1}{n} \tag{18}$$

광자의 운동방향과 평면과의 기하학적 관계는 평면의 방정식(17)과 직선의 방정식(18)이 주어졌을 때 평행, 수직 또는 임의의 각도로 교차하게 되는데 각각의 조건은 식(19), (20), (21)과 같다.

평행: $$lA+mB+nC=0 \tag{19}$$

수직: $$\frac{A}{l}=\frac{B}{m}=\frac{C}{n} \tag{20}$$

교차: $$\cos\left(\frac{\pi}{2}-\theta\right)=\frac{Al+Bm+Cn}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}\sqrt{l^2+m^2+n^2}} \tag{21}$$

형광전구에서 방사된 광자가 형광등의 반사갓에서 반사된 다음 다시 형광전구의 표면에 입사하고 반사되는 경우가 있는데 이는 직선과 곡면의 기하학적 관계로 설명될 수 있다. 광원면에서 반사하는 광자의 법면을 구하기 위해 광원을 그림8에 보인 것과 같이 직교좌표계상의 한 평면 위의 원으로 가정하였다.

두 점(P,Q)를 한 축으로 하는 새로운 좌표평면이 결정되면 2차곡면의 일반형 방정식(14)에 직선의 방정식(18)을 대입하여 곡면과 만나는 접평면의 식(22)를 구할 수 있다(Lindley, 1992).

$$\begin{aligned}&(2Ax+Dy+Ez+G)x+(2By+Dx+Fz+H)y \\ &+(2Cz+Ex+Fy+I)z+(Gx+Hy+Iz)=0\end{aligned} \tag{22}$$

표1. 원주의 일반형 방정식의 계수식

$A=[\,lx^2+(mz\cdot nx-nz\cdot mx)^2]$
$B=[\,mx^2+(nz\cdot lx-lz\cdot nx)^2]$
$C=[\,nx^2+(lz\cdot mx-mz\cdot lx)^2]$
$D=2[lx\cdot mx+(mz\cdot nx-nz\cdot mx)\cdot(nz\cdot lx-lz\cdot nx)]$
$E=2[lx\cdot nx+(mz\cdot nx-nz\cdot mx)\cdot(lz\cdot mx-mz\cdot lx)]$
$F=2[mx\cdot nx+(nz\cdot lx-lz\cdot nx)\cdot(lz\cdot mx-mz\cdot lx)]$
$J=-r^2$

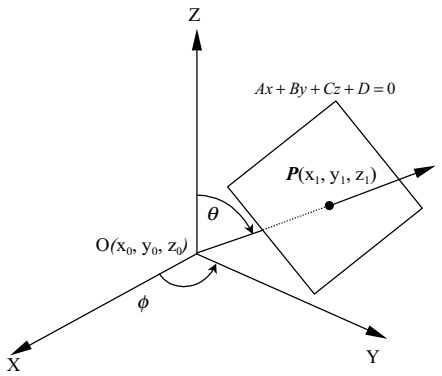


그림7. 광자와 평면의 교점

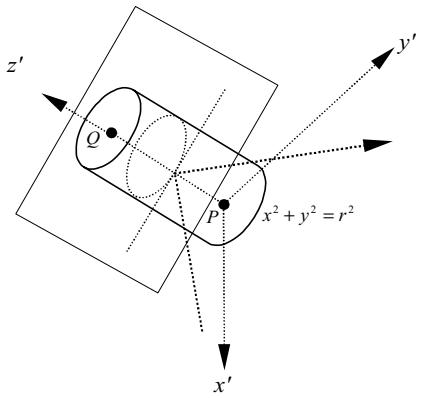


그림8. 광자와 곡면의 교점
(반사갓에서 반사된 광자가 형광전구 표면에 재입사하는 경우)

4. 측정을 통한 수치모델의 정확성 검증

4.1 측정의 개요

본 연구에서 개발된 수치모델의 정확성을 검증하기 위하여 실제의 방에서의 실측과 축소모형 실험을 행하였다. 표2는 각 측정의 조건으로서 형광등에 의한 실내조도에 영향을 미치는 변수, 실의 제원, 측정점, 광원의 종류 그리고 측정에 사용된 도구를 보인 것이다.

표2. 측정의 조건

	실제 방에서의 측정	축소모형 실험
변수	칸막이의 유무 광자의 발생개수	루버의 유무, 점등광원의 위치 실내표면 반사율(14%,76%)
크기	4.8m×4.8m×2.5m	1.2m×2.4m×1.2m
측정점	8×8(1단위=60㎝×60㎝)	3×6(1단위=38㎝×38㎝)
광원	반사형 FL40w×8	파라볼릭형 FL20×4
측정도구	디지털 조도계 1대 (Hioki 3422) 휘도계 1대(LS110 1/3)	데이터로거 1대 및 PC 대 (DATA SCAN) 조도계 18개(LI-210SA)

4.2 실제 방에서의 측정치와 계산치의 비교

그림9는 실측실험에 사용된 실의 모습이고 그림10은 칸막이를 설치했을 때의 측정장면이다. 표3은 발생광자수의 변화에 따른 측정치와 수치모델에 의한 계산치를 비교하여 보인 것이다. 여기서 상대오차는 식(23)에 의해 계산하였다.

$$\bar{e} = \frac{|\bar{E}_m - \bar{E}_c|}{\bar{E}_m} \times 100\% \qquad (23)$$

단, $\bar{e}$: 상대오차 [%],

$\bar{E}_m$: 측정조도의 평균치, $\bar{E}_c$: 계산조도의 평균치

그림11과 그림12는 광자의 발생개수에 따른 조도분포의 정확성을 비교하기 위한 것으로서 칸막이가 없는 경우와 칸막이가 설치된 경우 모두 광자의 개수가 증가할수록 조도분포가 측정치와 유사하게 됨을 알 수 있다.

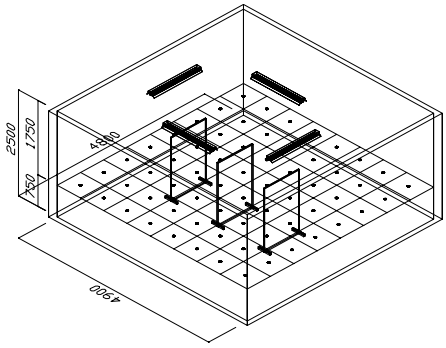
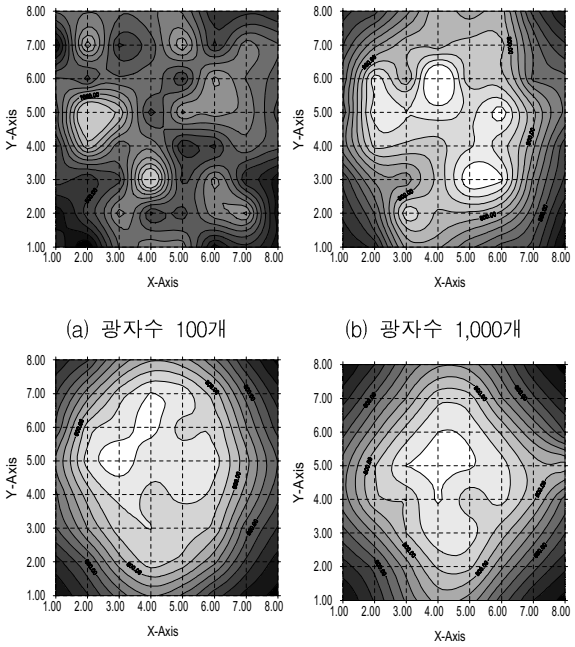


그림9. 실측실험을 위한 실의 모습

그림10. 칸막이를 갖는 실의 조도측정 장면

표3. 발생광자수 증가에 따른 측정치와 계산치의 비교

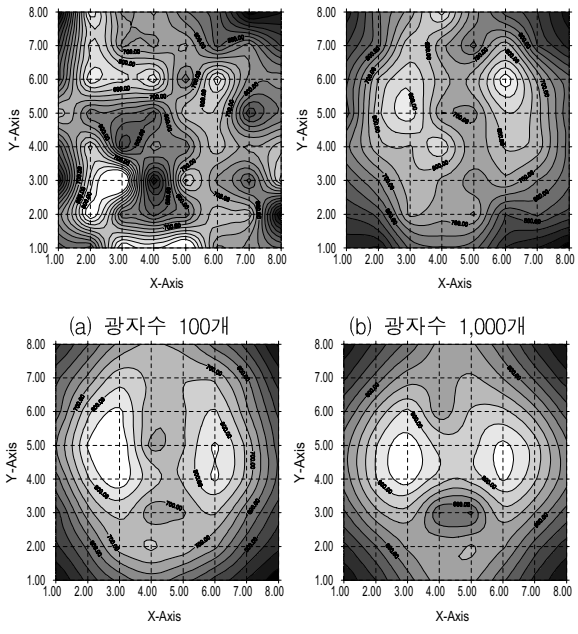
발생 광자수	칸막이	측정치(lx)	계산치(lx)	상대오차 (%)
100개	무	706.09	674.15	4.52
	유	625.69	645.70	3.19
1000개	무	706.09	732.42	3.73
	유	625.69	638.93	2.11
10,000 개	무	706.69	712.22	0.89
	유	625.69	637.60	1.90



(a) 광자수 100개 (b) 광자수 1,000개

(c) 광자수 10,000개 (d) 측정값에 의한 조도분포

그림11. 칸막이 없는 경우의 조도분포



(a) 광자수 100개 (b) 광자수 1,000개

(c) 광자수 10,000개 (d) 측정값에 의한 조도분포

그림12. 칸막이 설치한 경우의 조도분포

4.3 축소모형실에서의 측정치와 계산치의 비교

그림13은 축소모형실의 모습과 크기를 보인 것이다. 그림14는 축소모형실의 내부모습으로서 (a)는 실내표면 반사율이 14%, (b)는 76% 일 때의 측정장면을 보인 사진이다.

표4는 루버의 유무에 따른 측정치와 수치모델에 의한 계산치를 비교하여 보인 것이다. 직접조도와 간접조도 모두 10% 이내의 상대오차를 보였다.

그림15와 그림16은 축소모형실에서 점등광원별 조도분포를 나타낸 것으로서 그림15는 그림13에 표시한 1, 2번 광원을 점등했을 경우, 그림16은 3, 4번 광원을 점등했을 경우 측정치와 계산치의 조도분포를 나타낸 것이다.

그림17부터 그림20은 실내표면 반사율을 변화시키면서 루버의 유무에 따른 측정치와 계산치의 조도값을 비교하여 나타낸 그래프로서 본 연구에서 개발한 수치모델에 의한 계산치가 측정치와 매우 근사한 것을 알 수 있다.

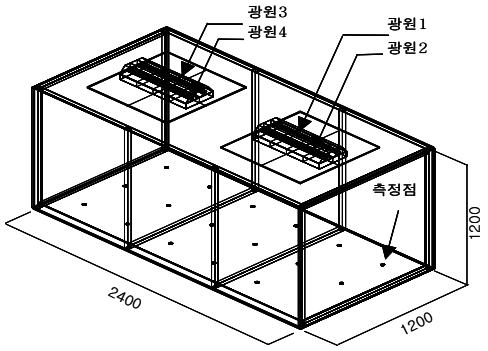
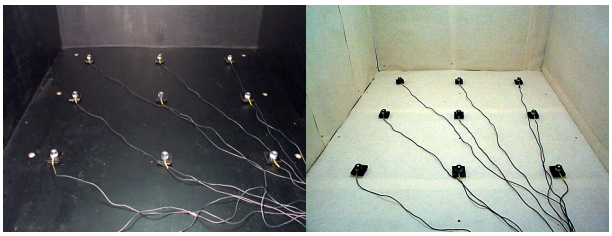


그림13. 인공조명실험실의 모습



(a) 실내표면 반사율 14%　　(b) 실내표면 반사율 76%

그림14. 인공조명실험실의 내부

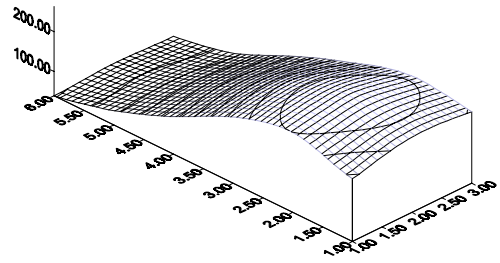
표4. 루버의 유무에 따른 측정치와 계산치의 비교

반사율	루버	상대오차(%)
직접조도 성분	무	5.20
14%	유	6.68
간접조도 성분	무	9.26
76%	유	5.45

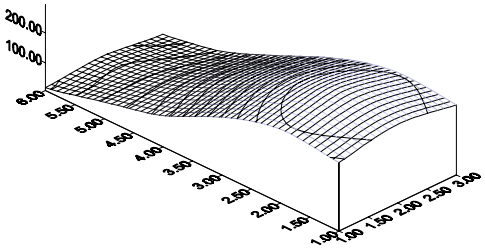
5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 형광등의 기하학·광학적 모델링 알고리듬을 정립하였고 형광등에 의한 실내조도를 예측할 수 있는 컴퓨터 모델을 개발하였다. 또한 형광등에 의한 실내조도에 영향을 미치는 주요 변수들을 설정하고 시뮬레이션하여 실제 방에서의 측정과 축소모형 실험을 통해 그 정확성을 검증하였다. 검증 결과, 본 연구에서 도출된 결론을 다음과 같다.

1) 칸막이의 유무에 따른 측정치와 수치모델의 계산치

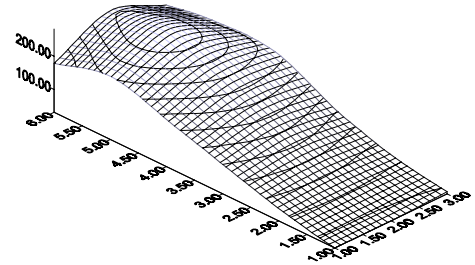


(a) 측정치

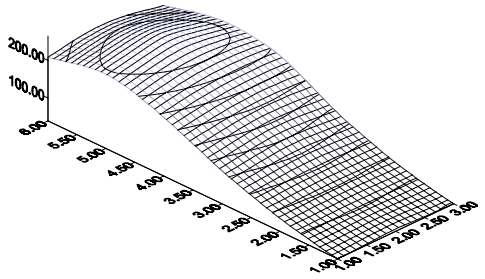


(b) 계산치

그림15. 3차원 조도분포의 비교
(루버 없는 경우: 점등광원 1,2)



(a) 측정치



(b) 계산치

그림16. 3차원 조도분포의 비교
(루버 없는 경우: 점등광원 3,4)

비교에서 상대오차가 5% 미만으로 나타났으며 광자수가 증가할수록 측정치와 유사한 조도분포를 보였다.

2) 루버의 유무에 따른 실험에서 평균상대오차가 루버를 장착하지 않은 경우 5.20%, 루버를 장착한 경우 6.68%로서 본 연구에서 개발한 수치모델이 높은 정확도를 갖는 것으로 검증되었다.

3) 점등광원의 위치에 따른 측정치와 계산치의 비교결과 상대오차가 10%내외로 나타났다.

4) 벽체 반사율의 변화에 따른 실험에서 측정치와 계산치의 평균상대오차가 10%내로 나타났다.

본 연구 결과를 바탕으로 하여 향후 연구되어야 할 사항들은 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 형광전구에 관한 모델링 방법만 정립되었지만 백열등과 같은 구형이나 다른 여러 가지 형태의 광원에 대한 모델링 방법의 정립과 이를 적용한 조도계산 프로그램의 개발이 계속적으로 이루어져야 할 것이다.

2) 조광제어(Dimming)에 따른 형광등의 광속 변화에 대하여 측정과 시뮬레이션과의 비교를 통해 전력별 형광등의 광속을 데이터베이스화 하는 작업이 요구된다.

3) 전력의 변화에 따른 형광등의 광속데이타를 가지고 자연채광 조도계산 프로그램과 연계하여 에너지 절약적인 인공조명기구의 제어 방법에 관한 연구가 이루어져야 한다.

참고문헌

1. 김재삼. 1997. 몬테카를로 방법의 물리학적응용, 민음사, 서울, pp.25-27.
2. 김훈. 1992. *몬테카를로법을 이용한 실내조도 계*산, 조명・전기설비학회지, 제6권, 2호, pp.37-42.
3. 백용배, 진대호. 1996. **解析幾何學**, 세종출판사, 부산, pp.275-276.
4. 유기형. 1997. *몬테카를로 방법과 광선추적기법에 의한 아트리움의 자연채광 성능 예측에 관한 연구*, 한양대학교 대학원 석사학위 논문.
5. Chen, L., M. Suzuki, T. Goda, and N. Yoshimura. 1998. *Louvre Lighting Performance: Monte Carlo Assessment*, Lighting Research & Technology, Vol. 30, No. 4, pp.165-168.
6. Chen, L., M. Suzuki, T. Goda, and N. Yoshimura. 1998. *Luminous Intensity Characteristics of Luminaires: Monte Carlo Simulation*, Lighting Research & Technology, Vol. 30, No. 4, pp.159-164.
7. Lindley, C. 1992. Practical Ray Tracing in C, John Wiley & Sons, Inc.
8. Tregenza, P. 1983. *The Monte Carlo Method in Lighting Calculation*, Lighting Research & Technology, Vol. 1, No. 4, pp.163-170.
9. **渡邊要**. 1975. **建築計劃原論I**, **丸善株式會社**. **東京**.

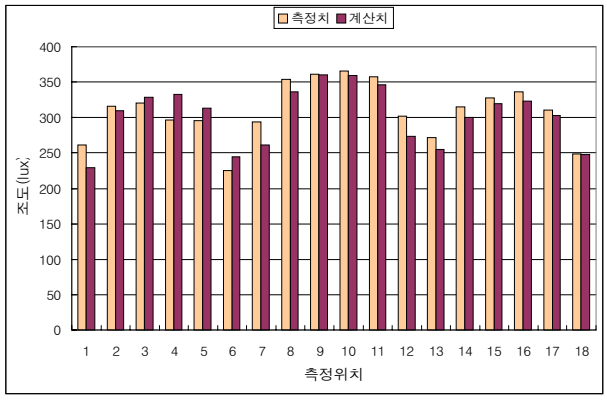


그림17. 루버 없는 경우의 조도분포(반사율14%)

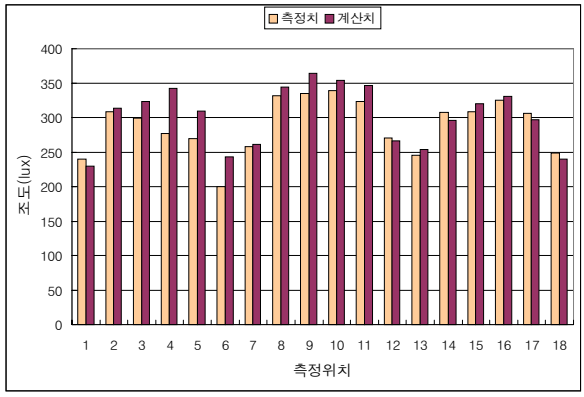


그림18. 루버 설치했을 경우의 조도분포(반사율14%)

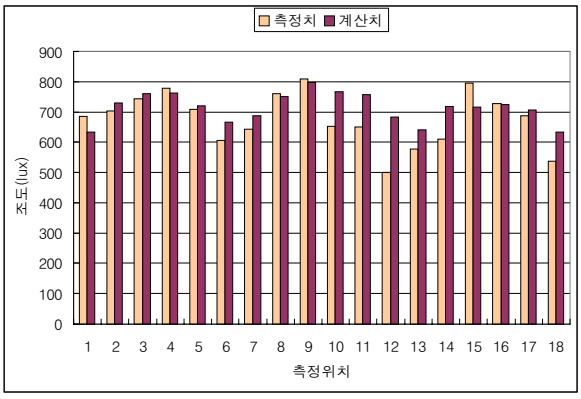


그림19. 루버 없는 경우의 조도분포(반사율76%)

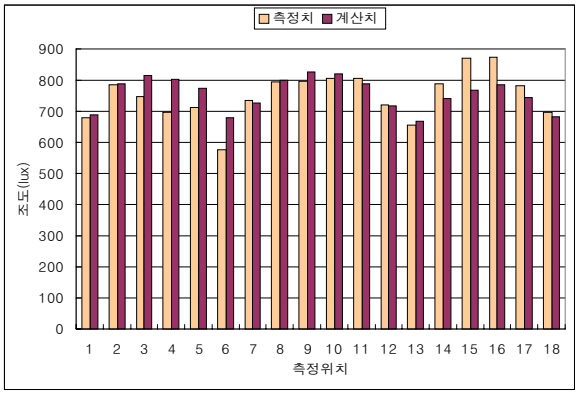


그림20. 루버 설치했을 경우의 조도분포(반사율76%)