

아트리움의 자연채광 성능 평가를 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델 개발

Developing a Computer Simulation Model for Estimating the Daylighting Performances of Atrium Spaces

송 규 동* 유 기 형**
Song, Kyoo-Dong Yu, Ki-Hyung

Abstract

Daylighting performance of an atrium space is mainly affected by the geometric configurations of atrium itself and canopy system together with the photometric characteristics of canopy glazing. Especially the impact of canopy system on the atrium daylighting is very difficult to evaluate because of the complex geometry and photometric properties. This study was performed to develop a computer model which can accurately estimate the illuminances inside the atrium space. The computer model was developed based upon the Monte Carlo method and Ray-tracing technique. The accuracy of the computer model was validated through measurements with physical scale models under real clear sky conditions.

키워드 : 자연채광, atrium, 몬테카를로방법, 광선추적기법, 페레즈 천공모델

Keywords : Daylighting, Atrium, Monte Carlo Method, Ray-tracing Technique, Perez Sky Model

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

아트리움의 자연채광 효과를 결정하는 주요 요소로는 atrium과 창호의 기하학적 형태, 창호 재료의 투과 특성, atrium 공간의 깊이를 나타내는 광정지수(Well Index) 등이 있다. 그 중에서 atrium 창호는 복잡한 기하학적 형상과 다양한 투과특성 때문에 직사일광이 유입되는 현상을 기존의 광속전달법(Higbie and Levine 1926)으로는 해석하기가 거의 불가능하다. 기존의 실험에 의한 연구(Song and Boyer 1994, Boyer and Song 1995)에서 atrium 창호에 따른 유효 투과율 개념을 적용한 설계 도구가 개발되어 있다. 그러나 모형실험은 시간과 비용 등의 문제점으로 인하여 실험결과를 일반화하는데는 한계가 있다. 따라서, atrium의 자연채광 성능을 평가하기 위해서는 좀더 일반적으로 사용될 수 있는 평가 도구의 개발이 필요하고 이는 결과를 쉽고 신속하게 얻을 수 있는 컴퓨터 모델에 의한 시뮬레이션 결과로부터 도출될 수 있다.

본 연구의 목적은 복잡한 형태와 다양한 투과특성을 갖는 atrium 창호의 자연채광 성능을 정확하게 예측할 수 있는 컴퓨터 모델을 개발하는 것이다. 본 연구에서 개발한 컴퓨터 모델은 몬테카를로방법과 광선추적기법을 적용한 것으로서, 컴퓨터 모델의 정확성은 축소모형 실험

을 통하여 검증하였다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 문헌에 의한 이론 연구, 컴퓨터 모델의 개발, 그리고 축소모형 실험을 통한 컴퓨터 모델의 검증 및 컴퓨터 모델을 이용한 atrium의 자연채광 성능분석의 순서로 진행되었다. 본 연구에서 개발한 컴퓨터 모델의 기본 이론인 몬테카를로 방법은 확률을 기본 개념으로 가지는 방법으로 컴퓨터가 개발되기 이전에는 두각을 나타내지 못하다가 컴퓨터가 급속히 발달하면서 이 방법을 공학적으로 적용할 수 있게됨으로써 그동안 해결할 수 없었던 여러가지 문제들을 해결 또는 예측할 수 있게 되었다.

또한, 광선추적기법은 광자가 운동하는 방향과 크기를 벡터화시키고 이것의 경로를 추적하여 복잡한 기하학적 형태를 갖는 atrium 창호를 통해 atrium 내로 유입되는 빛의 양과 atrium 내부에서의 상호 반사에 의한 계산대상면에서의 조도를 매우 정확하게 계산할 수 있는 기법이다. 표면에서 반사되는 빛의 방향은 몬테카를로 방법에 의해서 발생하는 난수(random number)에 의해 결정된다.

atrium 창호에 도달하는 외부 자연광을 모델링하기 위해서는 천공의 휘도분포를 예측할 필요가 있는데 천공의 휘도상태는 그날의 기상조건과 측정점의 지리적, 지형학적 위치에 영향을 받아서 매우 다양하게 변화한다. 따라서 이것을 정확히 수치적으로 예측하는 것은 쉽지 않지만 그동안 많은 연구와 실험에 의해 좀더 실제 천공상태와 비슷한 수치모델들이 개발되었다. 본 연구에서는

* 정희원, 한양대 건축공학과 교수, Ph.D.

** 정희원, 한국건설기술연구원 연구원, 공학석사

이 연구는 1996-99년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호:96-0602-02-01-3

다른 수치모델에 비해 실제의 천공상태를 가장 정확하게 예측할 수 있는 것으로 검증된 Perez의 천공 모델(Perez et al. 1990, 1993)을 채택하였다.

본 연구에서 개발한 컴퓨터 모델은 빛이 확산, 확산+경면, 경면 반사 및 투과되는 면에 적용시킬 수 있으며, 현재까지는 평면에 대한 것만이 고려되었고 입체 곡면을 가지는 면에 대한 것은 향후 보완될 것이다.

2. 기본이론의 고찰

2.1 몬테카를로방법(Monte Carlo Method)

몬테카를로 방법을 간단히 설명한다면, 난수를 발생하여 확률적 방법으로 수학적 문제를 해결하는 방법이다.

(1) 난수 발생

몬테카를로 방법을 이용하는데 있어서 중요하게 고려되어야 할 부분 중의 하나는 분포가 균일한 난수를 발생시키는 것이다.

난수 발생에서 고려해야 할 점들은 무작위성과 균일성을 갖는 좋은 분포, 긴 주기, 재생 가능성, 계산하는데 있어서의 효율성 등을 들 수 있다. 컴퓨터를 이용하여 균일 확률 분포를 가지는 난수를 발생시키는 방법은 여러가지가 있다. 그 중 일반적인 것으로는 선형 합동적 방법(Linear Congruential method)이 있다.

선형 합동적 방법은 Lehmer(1951)가 처음 사용한 이래 거의 표준적으로 사용되어 왔고 가장 좋은 방법으로 알려져 있다. 어떤 정수 S_i 가 주어졌을 때 이 수열은 식(1)과 같다.

$$S_{i+1} = (aS_i + c) \bmod m \quad (1)$$

여기서 a 는 승수(multiplier), c 는 증분(increment), m 은 계수(modulus)라고 부르며 이들은 모두 음이 아닌 정수들이다. $N \bmod m$ 은 N 을 m 으로 나누고 난 나머지를 말한다.

(2) 주어진 확률 분포에 따른 난수 발생 방법

위와 같은 방법으로 균일 확률 분포를 갖는 난수 발생기를 만들었으면 그것을 이용하여 원하는 확률 분포를 갖도록 변환시켜야 한다. 변환 방법으로는 일반적으로 역변환 방법(Inverse Transformation Method)과 거부법(Rejection Method)이 있다(김재삼 1997).

- 역변환방법(Inverse Transformation Method)

역변환 방법은 원하는 확률 밀도 함수의 적분값인 확률 분포 함수를 구하고 이 함수의 역함수를 구하여 균일 확률 분포 함수를 변환시키면 원하는 확률 분포를 갖는 난수열을 만들 수 있는 방법이다. 그림1은 이 방법의 개념을 보인 것이다. 이 방법은 역함수를 쉽게 구할 수 있다면 가장 효율적인 방법이 될 수 있겠지만 실제적으로는 그렇지 못한 경우가 대부분이기 때문에 실제 적용에는 비효율적인 방법이 된다.

- 거부법(Rejection Method)

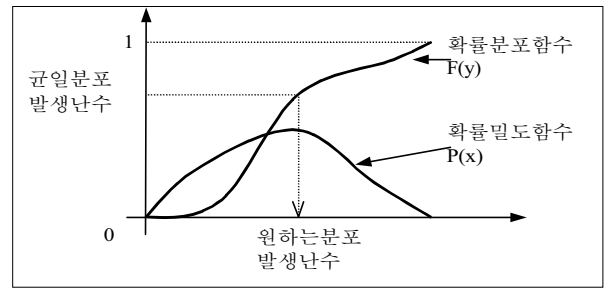


그림 1. 역변환 방법에 의한 난수 발생

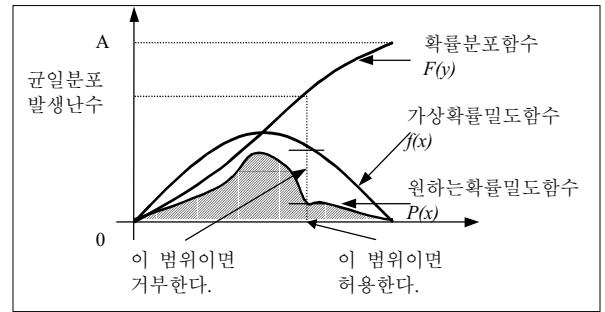


그림 2. 거부법에 의한 난수 발생

거부법은 역함수를 구하지 않고도 원하는 분포의 난수열을 발생시킬 수 있는 방법이다. 그림2에 보인 것처럼 역함수 대신 구하고자 하는 확률 밀도 함수를 에워싸는 가상 밀도 함수(비교 함수)를 생성한다. 우선 균일 확률 분포 난수를 발생시키고 이를 적절히 조작하여 주어진 조건을 만족하는 대강의 분포를 갖도록 한 다음에 원하는 분포 내에 들어가는지 않는지를 확인하여 거부 또는 선택을 하는 방법이다.

2.2 광선추적기법(Ray-tracing Technique)

광선추적기법은 광자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화시켜 공간 내에서 광자의 운동 경로를 수학적으로 예측할 수 있는 기법이다. 따라서 이 기법을 문제 해결에 적용시키기 위해서는 벡터에 대한 기본적인 이론을 이해하고 이 벡터가 공간상의 어떤 평면과 만날 경우 만나는 점의 교점과 이루는 각 등을 계산하는 식을 알아야 한다. 교차한 면에 대한 빛의 반사 특성, 투과 특성 등과 같은 벡터의 방향이나 크기에 변화를 줄 수 있는 요인 등을 고려하여 벡터의 새로운 방향과 크기를 결정하게 된다.

(1) 운동하는 광자와 공간의 평면이 만날 조건

광자가 재료의 표면에 의해 반사, 흡수, 또는 굴절되는 것을 시뮬레이션하기 위해서 우선 재료의 표면과 광자의 방향이 적합한지 검사한다.

- '광자의 방향과 표면의 방향이 반대인가?'에 대한 검사(그림3 참조)

여기서 X_E 는 발생점, E 는 방향성분, N_L 은 평면의 법선 벡터이고, 조건식은 $E \cdot N_L > 0$ 이 된다. 그래서 이 값이 성립하면 광자가 계산 대상 평면을 향하지 않고 있다는

것을 의미한다.

- '평면의 면적 안에 입자가 들어오는가?'에 대한 검사 (그림4 참조)

X_1 는 평면과 광자의 교점, V_{11} 는 평면의 첫 번째 꼭지점 X_1 를 시작점, 교점 X_i 를 끝점으로 하는 벡터, V_{12} 는 첫 번째 꼭지점 X_1 를 시작점, 두 번째 꼭지점 X_2 를 끝점으로 하는 벡터, N_1 은 $V_{12} \times V_{11}$ 의 값으로, 꼭지점들의 법선 벡터 N 과 광자의 방향 벡터 E 의 관계에서 조건식은 $N_i \cdot E > 0$ (i = 꼭지점 번호)가 된다. 그래서 모든 꼭지점에서 조건식을 검사하여 조건식을 만족하는 경우가 발생하면 광자는 평면의 범위안에 들어오지 않는 것을 알 수 있다.

- '표면이 입자가 발생된 지점의 뒤쪽에 있지는 않은가?'에 대한 검사(그림5 참조)

조건식은 $(X_i - X_E) \cdot E < 0$ 이 된다. 여기서 X_E 는 입자의 발생점, X_i 는 평면과 만나는 교점, E 는 입자의 방향성분 벡터가 된다. 따라서 위 식을 만족하면 계산에서 제외될 수 있다.

(2) 면에서 반사되거나 투과되는 입자의 새로운 벡터 계산(그림6 참조)

우리가 일반적으로 쓰는 벡터는 x, y, z 을 축으로 하는 직교좌표계이다. 그러나 입사각, 반사각 등 어떤 각도를 이용해 그 점의 위치나 벡터의 방향을 알아야 할 경우 좌표계를 원주좌표계나 극좌표계로 변환시켜야 한다. 점 P 의 직교좌표 (x, y, z) 와 극좌표 (r, θ, ϕ) 사이에는 다음과 같은 식(2)가 성립한다(권택연 외 1976).

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \phi & r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ y &= r \sin \theta \sin \phi & \tan \theta &= \sqrt{x^2 + y^2} / z \\ z &= r \cos \theta & \tan \phi &= y / x \end{aligned} \quad (2)$$

2.3 Perez 천공 모델

자연채광에 의한 실내 조도를 예측하기 위해서는 직사일광과 확산 천공광에 의한 외부조도를 알아야 하는 것이 무엇보다 중요하다. 천공광의 경우, 실제 천공 상태의 휘도 분포를 정확하게 예측하기란 거의 불가능하다. 하지만 많은 연구에 의해서 실제 천공상태와 비슷한 천공 모델들이 개발되었다. 현재까지 개발되어 있는 천공 휘도 분포 모델 중 다양한 상태의 천공 조건에 대해 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 모델은 Perez의 모델(Perez et al. 1990, 1993)이다.

Perez 모델은 태양 천정각, 천공의 청정도, 천공의 밝기 및 대기의 수증기량의 4가지 인자를 사용하여 천공의 휘도 분포를 식(3)~식(19)의 단계를 거쳐 계산할 수 있는 것이다.

$$\Delta = [(I_d + I_{DN}) / I_d + 1.104Z^3] / [1 + 1.104Z^3] \quad (3)$$

$$\epsilon = I_d \times m / I_{ON} \quad (4)$$

$$W = \exp(0.07 \times T_d - 0.075) \quad (5)$$

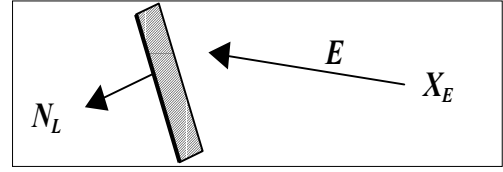


그림 3. 광자의 방향과 표면의 방향 검사

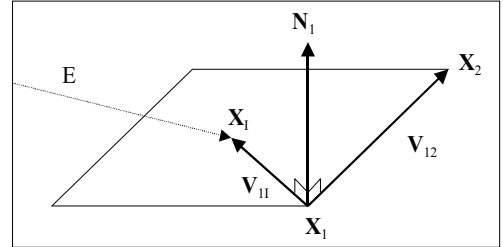


그림 4. 광자가 평면의 범위안에 들어오는가를 검사

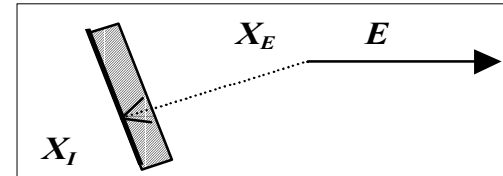


그림 5. 평면이 광자의 출발점 뒤에 있는지의 검사

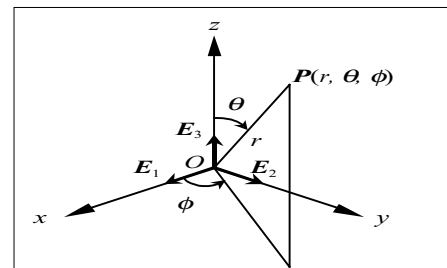


그림 6. 극좌표계

단,

Z: 태양 천정각 (rad)

Δ : 천공의 청정도 (1~8)

ϵ : 천공의 밝기

W: 대기 수증기량

I_d : 수평면 확산 일사량 (W/m^2)

I_{DN} : 법선면 직달 일사량 (W/m^2)

M: 대기의 광학적 두께

I_{ON} : 대기권밖의 법선면 일사(W/m^2)

T_d : 3시간 동안의 지표면 노점 온도($^{\circ}C$)

대기권 밖의 법선면 일사(I_{ON})와 대기권 밖의 수평면 일사 (I_{oh})는 각각 식(6)과 식(7)에 의해 계산한다.

$$I_{ON} = I_{sc} [1 + 0.33 \cos(\frac{360n}{365})] \quad (6)$$

$$I_{Oh} = I_{sc} [1 + 0.33 \cos(\frac{360n}{365})] \times \cos Z \quad (7)$$

단,

I_{sc} : 태양 상수 (1350 W/m²)

n : 1월1일로부터의 통산일 ($1 \leq n \leq 365$)

천공 청정도는 식(8)에 의해 계산한다.

$$k_T = I_T / I_{Oh} \quad (8)$$

단,

k_T : 시간별 청정도

I_{Oh} : 대기권 밖의 수평면 일사량(W/m²)

그리고, 확산 일사량은 식(9)에 의해 구한다.

$$\begin{aligned} I_d/I_T &= 1.0 - 0.09 k_T \quad (k_T \leq 0.22) \\ &= 0.9511 - 0.1604k_T + 4.3888k_T^2 \\ &\quad - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 \quad (0.22 < k_T \leq 0.8) \\ &= 0.165 \quad (0.8 \leq k_T) \end{aligned} \quad (9)$$

또한, 수평면 직달 일사량과 연직면 직달 일사량은 각각 식(10)과 식(11)에 의해 구한다.

$$I_{DH} = I_T - I_d \quad (10)$$

$$I_{DN} = I_{DH} / \sin(a_t) \quad (11)$$

단, a_t : 태양 고도각 (rad)

천공의 밝기(Δ)를 계산하기 위하여, 광학적 대기의 두께(m) 과 대기권 밖의 법선면 직달일사량(I_{ON})이 입력값으로 필요하다. 태양이 천공 천정에 있을 때의 복사선이 통과하는 대기의 두께와 임의의 위치에서 통과하는 대기 두께와의 비율인 광학적 대기의 두께는 식(12)에 의해서 얻어진다.

$$m = 1/\cos Z \quad (12)$$

연직면 및 수평면 직달 조도(E_{dH})와 수직면 직달 조도(E_{dV})는 각각 식(13), 식(14), 식(15)에 의해 구할 수 있다.

$$E_{dN} = \text{MAX}\{0, I_{dN}[a_i + b_i W + c_i \exp(5.73Z - 5) + a] \} \quad (13)$$

$$E_{dH} = E_{dN} \times \sin(a_t) \quad (14)$$

$$E_{dV} = E_{dN} \times \cos(a_t) \quad (15)$$

단,

E_{dN} : 법선면 직달 조도 (lx)

E_{dH} : 수평면 직달 조도 (lx)

E_{dV} : 수직면 직달 조도 (lx)

a_t : 입사각 (rad)

a_i, b_i, c_i, d_i : 실험식에 의해 구해진 계수

수평면 확산 조도 (E_{kH})는 식(16)으로 구할 수 있다.

$$E_{kH} = I_d \{ a_i + b_i W + c_i \exp(Z) + d_i \ln(\Delta) \} \quad (16)$$

경사면 확산 조도(E_{kS})는 수평면 확산 조도와 표면의 기울기를 고려하여 식(17)에 의해 구한다.

$$E_{kS} = E_{kH} \{ (1 - F_1)(1 + \cos S)/2 + F_1 \times a/b + F_2 \sin S \} \quad (17)$$

단,

$$F_1 = f_{11} + f_{12} + f_{13} \times Z$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22} + f_{23} \times Z$$

$$a = \max(0, \cos)$$

$$b = \max(0.087, \cos Z)$$

S : 경사면의 기울기

$f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{21}, f_{22}, f_{23}$: 천공 청정도의 함수

천공의 임의의 점의 휘도(L_v)의 천공 휘도의 비율로서 정의되는 상대 휘도(lv)는 식(18)에 의해 구한다.

$$\begin{aligned} lv &= f(\zeta, v) \\ &= \{1 + a \exp(b/\cos \zeta)\} \{1 + c \exp(dv) + e \cos 2v\} \end{aligned} \quad (18)$$

단,

lv : 상대 휘도

v : 태양과 예측점 사이의 각 (rad)

ζ : 예측점의 천정각 (rad)

a, b, c, d, e : 일사 상태의 실험 계수

최종적으로 천공 휘도(L_v)는 확산 조도의 천공 모델을 일반화하여 식(19)로부터 얻을 수 있다.

$$L_v = l_v \times \frac{E_{kH}}{\int_{2\pi sr} (l_v(\zeta, \gamma) \cos \zeta) d\omega} \quad (19)$$

3. 컴퓨터 모델의 개발

3.1 컴퓨터 모델의 개요

본 연구에서 개발한 컴퓨터 모델은 그림7과 같이 입력 모듈, 계산모듈 및 출력모듈로 구성되어 있다. 그림8은 컴퓨터 모델의 흐름도를 보인 것이다. 입력모듈에 의해 필요한 자료를 입력한 다음 계산모듈은 다음과 같은 방법으로 아트리움 내부의 직사일광 조도 및 천공확산광 조도를 계산하고 그 결과를 출력한다.

3.2 직사일광 조도의 계산

우선, 외부의 천기상태에 따라서, 직사일광이 존재할 경우 태양의 위치(고도, 방위각)를 계산하고 그림9와 같이 아트리움 건물 전체를 포함시킬 수 있는 가상의 광원면을 결정하게 된다. 이는 태양광선의 직달성분이 평행광선이기 때문에 가능한 것이다. 가상 광원면의 크기가 결정되면 Perez 천공모델에 의해 계산된 법선면 직사일광

조도를 가상의 광원면에서 발생시켜야 할 광자의 개수로 나누어 광자 한 개당의 조도를 결정한다. 그리고 가상 광원면에서의 광자의 발생위치는 몬테카를로 방법에 의한 난수(random number)를 발생하여 결정하고, 발생된 광자의 진행방향은 태양의 고도와 방위각에 의해 결정한다.

발생된 광자가 아트리움 천장으로 입사하지 않는 경우에 이 광자는 소멸시키고 가상 광원면에서 다음 광자를 발생시킨다. 그리고 그림10에 보인 것과 같이 아트리움의 창호면에 도달한 빛은 일부는 반사 및 흡수되고 나머지가 투과 되므로 투과된 광자의 방향은 몬테카를로 방법에 의해 또 다른 새로운 방향을 결정한다. 아트리움 내부로 유입된 광자는 아트리움 벽면 재료의 반사율과 투과율에 따라 또다시 난수를 발생시켜서 광자의 소멸 여부를 결정하게 된다. 이때, 반사되는 것으로 결정되어 새로운 방향벡터를 가진 광자는 다른 평면에 입사하는지를 다시 검사하게 된다. 이 과정을 광자가 소멸될 때까지 반복한다. 그리고 계산대상면에 직접 도달하지 않은 광자는 아트리움 내부의 각 표면에서 상호 반사한 다음 계산 대상면에 도달하게 되는데 이때의 광자의 방향과 진행방향도 몬테카를로방법과 광선추적기법에 의해 결정한다. 직사일광의 광자가 모두 발생되어 모두 소멸한 후에는 아트리움내의 각각의 계산 대상면으로 입사된 광자의 총 개수를 계산하여 직사일광에 의한 조도를 구한다.

3.3 확산천공광 조도의 계산

확산천공광에 의한 아트리움 내부의 조도를 계산하기 위해서는 먼저 Perez 천공모델에 의한 외부 수평면 확산 조도와 천공의 휘도분포를 구한다. 천공에서는 발생하는 광자의 위치와 방향이 무작위성을 가지기 때문에 조도계산 대상면으로 들어오는 광자를 결정하기 힘들다. 따라서 직사일광의 경우와는 반대로 조도계산 대상면에서 광자를 발생시켜 외부 천공에 도달한 광자만을 대상으로 하여 조도를 계산한다. 그림11은 계산 대상면에서 발생된 광자가 외부 천공에 도달하는 예를 보인 것이다. 광자의 개수와 크기는 수평면 확산조도를 계산 대상면의 면적에 적용하여 총 광자의 세기를 결정하고 광자의 수에 따라 광자 한 개당 빛의 세기를 결정할 수 있게 된다. 외부 천공의 휘도분포에 따라 외부 천공에 도달한 광자에 가중치를 주어 천공의 휘도분포에 따른 영향을 계산할 수 있다. 광자가 모두 발생되었으면 계산 대상면에 들어온 광자의 개수를 계산하여 확산 천공광에 의한 계산 대상면의 조도를 구할 수 있다.

4. 축소모형 실험을 통한 컴퓨터 모델의 검증

4.1 축소모형 실험의 개요

본 연구에서 개발한 아트리움 내부 조도 예측 컴퓨터 모델의 정확성을 검증하기 위해서 아트리움 축소 모형을 이용한 실험을 행하였다.

(입력모듈)
○ 예측 장소의 위도, 경도, 측정시간, 일사량, 노점온도 입력
○ 조도 계산대상면 및 기타면들의 공간 좌표, 그리드수, 반사율, 투과율, 확산율 입력
(계산모듈)
○ 태양의 고도, 방위각 계산
○ Perez모델을 이용한 법선면적달조도, 수평면확산조도 계산
○ 외부 조도값에 의한 광자의 크기와 개수를 결정
○ 직사일광의 광자를 발생시켜 계산대상면의 조도를 계산
○ 천공광의 광자를 발생시켜 계산대상면의 조도를 계산 (Perez 천공 휘도 분포 모델을 이용)
(출력모듈)
○ 조도 계산대상면으로 들어온 직사일광의 광자와 천공광의 광자의 개수를 합하여 전체 조도를 계산하고 출력

그림 7. 컴퓨터 모델의 구성모듈

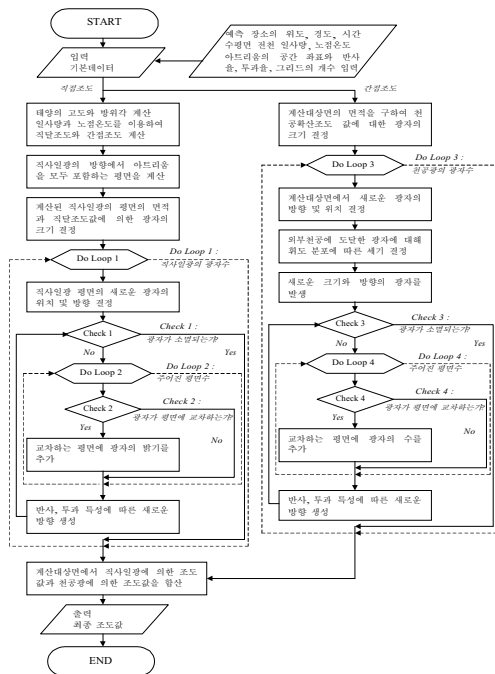


그림 8. 컴퓨터 모델의 흐름도

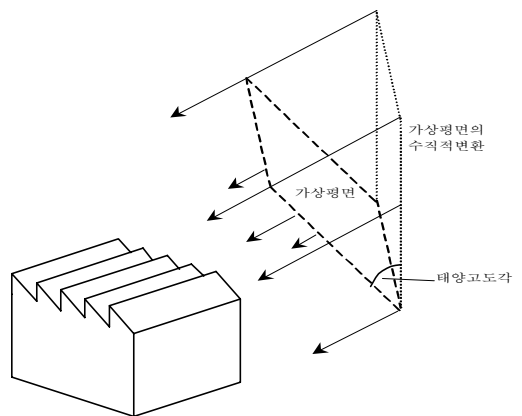


그림 9 직사일광의 광자 발생을 위한 가상 평면

설계단계에서 아트리움의 자연채광 성능을 예측 및 평가하기 위해서 대부분의 경우 아트리움과 창호의 축소모형을 제작하여 실제의 천공상태 또는 인공천공실에서 측정하는 축소모형 실험에 의존하고 있다 (Spitzglas 외 1985). 다른 건축환경요소 즉, 공기의 이동이 수반되는 열이나 파장이 긴 음의 경우 축소모형실험은 상사율 등의 법칙을 지키는 것이 매우 어려운 과제이지만 빛환경의 경우 건물을 축소해 놓더라도 실험대상인 빛은 매우 짧은 파장의 복사(380nm-780nm)이므로 축소모형실험에 의한 결과와 실제의 건물에서 측정한 결과로부터 거의 동일한 값을 기대할 수 있다. 따라서, 축소모형에 실험으로부터 얻은 값을 수치모델에 의한 계산 값을 검증하는데 사용할 수 있다.

그림12는 북향 툽날형 창호를 갖는 아트리움 축소모형의 단면을 보인 것이다. 그림에서 보인 것과 같이 아트리움의 광정지수를 쉽게 변경하기 위하여 바닥판을 상하로 움직일 수 있게 하였다. 그림13은 건물 옥상에서 아트리움 축소모형의 바닥면 조도를 측정하고 있는 모습이다.

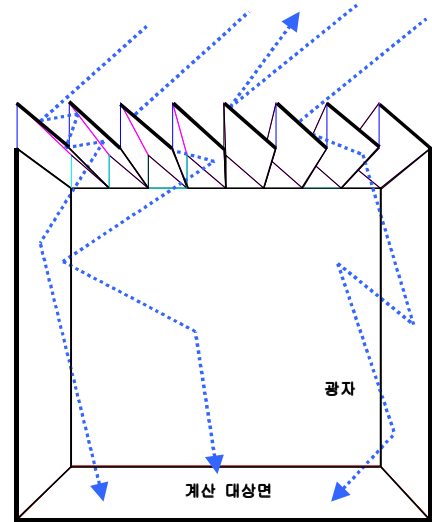


그림 10. 아트리움 내부로 유입된 직사일광 광자의 개념

4.2 측정치와 계산치의 비교

표1은 청천공 상태에 대한 축소 모형의 측정치와 컴퓨터 모델에 의한 계산치를 보인 것이다. 표1에서 상대오차는 식(20)에 의해 계산한 것이다.

$$(20)$$

- 단,
- : 상대오차 [%]
 - : 측정 조도의 평균치
 - : 계산 조도의 평균치

표1과 그림14, 그림15, 그림16에 나타난 바와 같이 상대오차가 5% 이내로서 본 연구에서 개발한 컴퓨터 모델의 정확성이 매우 높은 것으로 검증되었다. 특히, 그림14는 아트리움 상부에 창호가 설치되지 않은 경우로서 직사일광에 노출된 측정점 2, 3 및 4의 조도를 컴퓨터 모델이 매우 정확하게 계산한 것을 알 수 있다.

4.3 아트리움 자연채광 설계도구

그림17과 그림18은 본 연구에서 개발된 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 이용하여 얻은 아트리움 자연채광 설계도구의 한 예를 보여주고 있다. 두 그림은 각각 북쪽을 향한 툽날형 창호를 갖는 아트리움의 광정지수별로 직달성분비 및 확산성분비를 보여 주는 것으로서 직달성분비의 경우 광정지수가 커질수록 낮아지며, 태양 고도가 높을수록 높아지는 것을 알 수 있다. 확산성분비의 경우는 광정지수가 커질수록 낮아지지만 태양 고도의 변화는 크지 않은 것을 볼 수 있다. 다양한 창호에 대해 시뮬레이션을 수행 함으로써 건축설계의 초기 단계에서 아트리움의 개략적인 제원과 창호의 종류에 대해 손쉽게 평가할 수 있는 설계도구를 개발할 수 있을 것으로 사료된다.

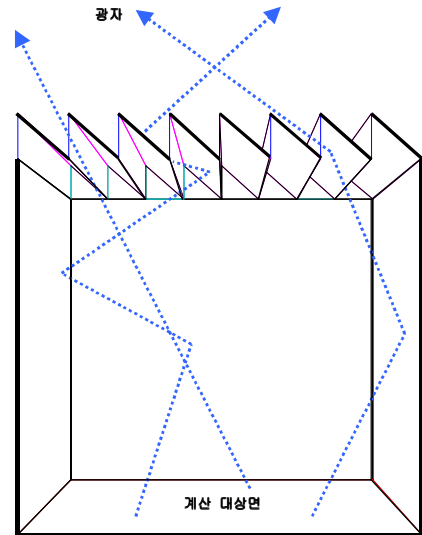


그림 11. 확산 천공광 조도를 계산하기 위한 광자의 개념

5. 결 론

본 연구에서는 아트리움 내부의 조도를 예측할 수 있는 컴퓨터 모델을 개발하였으며, 모형 실험을 통해 그 정확성을 검토하였다. 검토 결과, 측정치와 계산치 사이의 상대오차가 5% 이내로서 본 연구에서 개발한 컴퓨터 모델이 아트리움의 초기 설계 단계에서 매우 정확하게 자연채광 성능의 평가를 위한 도구로서 활용될 수 있을 것으로 사료되었다. 특히, 기존의 컴퓨터 모델들이 천공 확산광에 대해서만 예측이 가능한 것에 비해서 광선추적기법을 적용한 본 연구의 컴퓨터 모델은 직사일광과 천공광이 동시에 유입되는 경우에도 정확한 예측이 가능하였다.

다음은 본 연구에서 개발된 컴퓨터 모델을 더욱 발전

시키기 위하여 추후 연구되어야 할 사항들이다.

(1) 시뮬레이션 시간에 가장 영향을 많이 미치는 것은 광자의 발생 개수이다. 광자의 발생 개수가 증가함에 따라 거의 정비례적으로 계산 시간이 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 보다 복잡한 형태의 아트리움에 대해 정확한 계산값을 얻기 위해서는 계산 시간을 효율적으로 줄일 수 있는 연구가 필요하다.

(2) 본 연구에서 개발된 컴퓨터 모델에는 곡면 형태는 고려되지 않았지만 곡면을 갖는 아트리움에 적용하기 위해서 이 부분에 대한 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

(3) 조도를 예측하는 것과 마찬가지로 몬테카를로방법, 광선추적기법 등을 이용하면 실내 휘도도 예측할 수 있다. 그리고 이것에 색채와 재료의 광학적 특성을 적용시키면 실제와 거의 같은 상황을 컴퓨터 화면에 가시화시킬 수 있기 때문에 아트리움 내부의 시환경을 정성적으로 평가하기 위해서 앞으로 이 분야에 대한 연구도 필요하다.

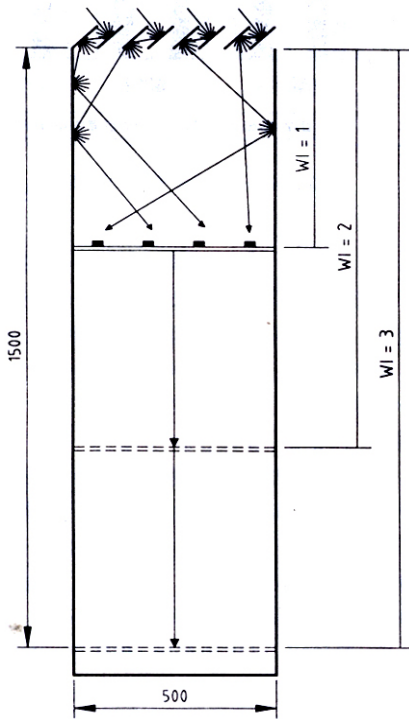


그림 12. 아트리움 축소모형 실험 장면

표 1. 측정치와 계산치의 상대오차

	측정치 평균	계산치 평균	상대오차
창호가 없을때	62290.02 lx	63356.87 lx	1.68 %
15도 톱날형	3956.04 lx	3972.54 lx	0.42 %
45도 톱날형	11095.95 lx	10584.97 lx	4.83 %



그림 13. 아트리움 축소모형 실험 장면

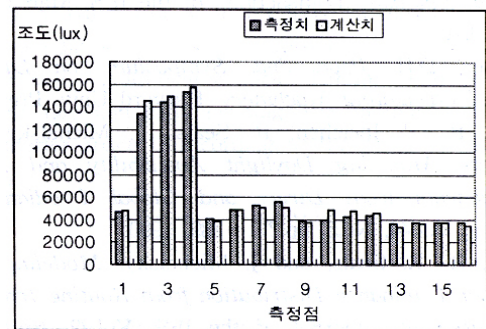


그림 14. 창호를 설치하지 않았을 때의 조도분포

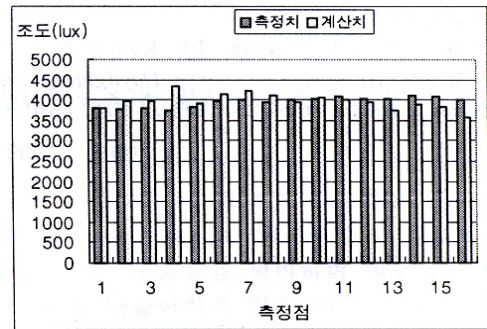


그림 15. 15도 톱날형창호 설치시 조도분포

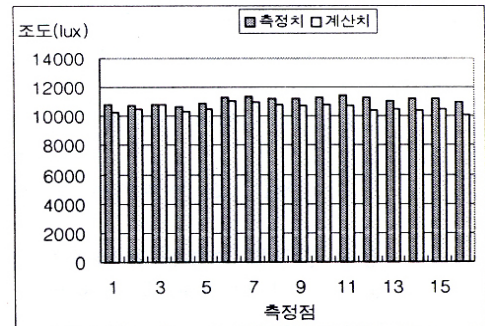


그림 16. 45도 톱날형창호 설치시 조도분포

참 고 문 헌

1. 김재삼. 몬테카를로 방법의 물리학적응용 1판, 민음사, 서울, pp.25~27, 1997.
2. 권택연, 임정대. 대수·기하학, 문운당, 서울, pp.203~204, 1976.
3. Boyer, L.L. and K.D. Song. *Daylighting and Sunlighting Effectiveness with Various Atrium Canopy Systems*, Proc. 20th National Passive Solar Conference, Minneapolis, MN., American Solar Energy Society, July 1995.
4. Choi, A.S. A Systems Modeling Approach to The Analysis of Daylight Dimming Systems, Doctoral Dissertation, Pennsylvania State Univ., pp.65~73, May 1997.
5. Highbie, H.H. and A.A. Levine. *Prediction of Daylight from Sloped Windows*, Transactions of the IES, March, pp.273~324, 1926.
6. Lehmer, D.H. *Proc. 2nd Symposium on Large-Scale Digital Calculating Machinery*, Harvard Univ. Press, 1951.
7. Perez, R.; P. Ineichen; R. Seals.; J. Michalsky; and R. Stewart. *Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance*, Solar Energy, Vol.44, No.5, pp.271~289, 1990.
8. Perez, R.; R. Seals, and J. Michalsky. *Modeling Skylight Angular Luminance Distribution from Routine Irradiance Measurements*, Journal of the IES, Vol.22, No.1, IESNA, pp.10~17, 1993.
9. Song, K.D. and L.L. Boyer. *Instrumentation System for Evaluating Daylighting Performance in Sunlit Atria with Design Stage Scale Models*, ASHRAE Transactions, Vol. 100, Part1, 1993.
10. Spitzglas, M., M. Navvab, J.J. Kim and S. Selkowitz, *Scale Model Measurements for a Daylighting Photometric Database*, Journal of the IES, IESNA, Fall, pp.41~61, 1985.

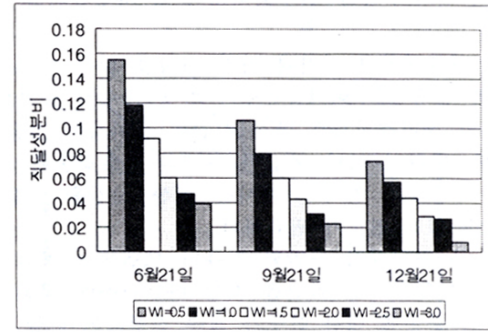


그림 17. 광정지수별 직달성분비

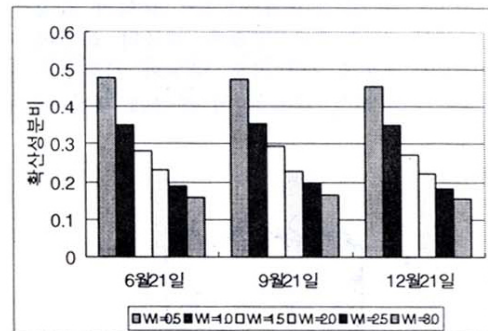


그림 18. 광정지수별 확산성분비

