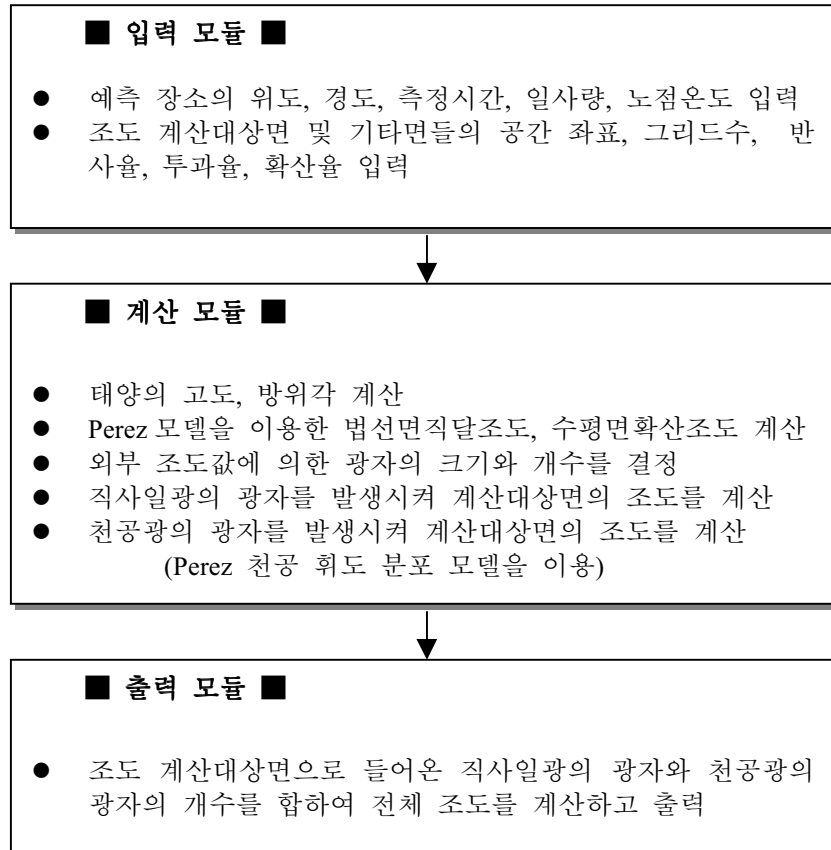


제 3 장 컴퓨터 모델의 개발

3.1 컴퓨터 모델의 개요

본 컴퓨터 모델은 몬테카를로 방법과 광선 추적법을 적용하여 아트리움의 깊이
의 변화와 창호 종류의 변화에 따른 실내 조도를 예측할 수 있도록 개발되었다. 컴
퓨터 모델의 내용을 살펴보면, 예측 장소의 위도, 경도, 측정 시간, 일사량, 노점 온
도 등의 지형적 기상적 데이터들이 입력되어야 하고, 계산대상면, 기타 평면들의
공간 좌표, 그리드 수, 반사율, 투과율, 확산율을 입력해야 한다. 기본적인 데이터
입력이 끝났으면, 컴퓨터 모델은 위도, 경도, 측정 시간을 이용하여 그 시간의 태양
의 고도와 방위각을 계산하게 된다. 계산된 태양의 고도와 방위각에 의하여 직사일
광의 방향을 벡터화시킬 수 있다. 천공광의 경우 Perez 천공 모델을 이용하여 수평
면 확산 조도와 법선면 직달 조도를 계산하고 천공의 휘도 분포를 계산하게 된다.
외부 조도값이 결정되면 그것에 의한 광자의 크기와 방향을 결정하게 된다. 이 때
에 직사일광의 경우는 광자가 발생 될 임의의 평면을 설정해야 하는데 이 평면의
법선 벡터 방향에서 조도 계산 대상 아트리움이 설정된 광장 발생면의 범위내에
들어와야 한다. 설정된 평면에서 난수를 발생시켜 광자의 발생 위치를 결정하게 되
고, 천공광의 경우는 계산대상면에서 난수를 발생시켜 광자의 발생 위치와 방향을
결정하게 된다.

직사일광의 경우 입력된 평면들을 모두 포함하고 주어진 직사일광의 벡터를 법
선벡터로 하는 평면내에서 광자를 발생시켜 아트리움 창호와 내부 벽면을 통과하
여 계산 대상면에 도달한 광자의 수를 더해줌으로써 직사일광에 의한 조도를 구할
수 있다. 천공광의 경우 계산 대상면에서 광자를 발생시켜 발생된 광자가 아트리움
창호와 내부 벽면을 통과하여 외부 천공에 도달할 경우 처음 발생된 계산 대상면
의 위치에 광자의 수를 더해줌으로써 천공광에 의한 조도를 구할 수 있다. 직사일
광 및 천공광의 광자를 모두 발생시켰으면, 계산대상면에 들어왔던 광자의 수를 모
두 합하여 직사일광과 천공광에 의한 실내 조도를 구할 수 있다. 컴퓨터 모델의 기
본적 흐름은 [그림 3.1.1]과 [그림 3.1.2]와 같다.



[그림 3.1.1] 컴퓨터 모델의 개요

본 연구에서 개발된 컴퓨터 모델은 입력 모듈, 계산 모듈 및 출력 모듈로 이루어져 있다. 입력 모듈에서는 예측 장소의 위치와 측정시간, 일사량, 노점온도 등의 외부 변수와 계산 대상면 및 기타 면들의 공간 좌표, 그리드 수, 반사율 등 모델 변수를 입력한다. 계산 모듈은 입력된 데이터를 이용하여 태양의 위치를 계산하고, Perez 모델을 이용하여 외부 조도 및 천공의 휘도 분포를 계산한다. 계산된 외부 조도값에 의해 광자의 크기와 개수를 결정하게 된다. 그리고 광자를 발생시켜 직사일광과 천공광에 의한 계산 대상면의 조도를 계산하게 된다. 출력 모듈은 계산된 직사일광에 의한 조도와 확산 천공광에 의한 조도를 합하여 계산 대상면의 각 그리드별 조도를 출력한다.

3.2 외부 천공 상태 계산

3.2.1 외부 직사일광 조도와 천공 확산광 조도의 계산

외부 직사일광 조도와 확산천공광 조도를 구하기 위해서 외부 직달일사와 확산 천공일사를 계산해야 한다. 외부 직달일사와 확산천공일사를 구하기 위해서 외부 수평면 전체 일사량의 입력 데이터가 필요하다. 전체 일사량에서 직달일사와 확산 일사를 분리하기 위해서 시간별 청정도 지표(K_T)를 사용하였다. 시간별 청정도 지표는 수평면 전체일사를 대기권 밖의 수평면 전체일사로 나눈 값이다. 전체 일사량에 대한 확산 일사량의 비율을 시간별 청정도 지표를 이용하여 계산할 수 있다. (식 3.2.2)와 같이 청정도의 범위를 나누어 적용하는 식이 각각 다르다.

$$K_T = I_T / [1350 * \{1 + 0.33 * (PI * 2 * n / 365)\} * \cos(Z)] \quad (\text{식 3.2.1})$$

$$I_d = (1 - 0.09 * K_T) * I_T \quad (K_T \leq 0.22) \quad (\text{식 3.2.2})$$

$$= (0.951 - 0.1604 * K_T + 4.3888 * K_T^2 - 16.638 * K_T^3 + 12.336 * K_T^4) * I_T \quad (K_T \leq 0.8)$$

$$= 0.165 * I_T \quad (K_T > 0.8)$$

$$I_{DN} = (I_T - I_d) / \sin(h) \quad (\text{식 3.2.3})$$

여기서, K_T : 청정도 지표

I_T : 전체일사량

Z : 천정각

I_d : 전체일사

I_{DN} : 직달일사

h : 태양고도

직달일사와 확산일사 값을 이용하여 천공의 청정도(ϵ), 천공의 밝기(Δ)를 구하고 지표면 노점온도를 이용하여 대기 수증기량을 구한다. 계산된 청정도 값은 8 단계 범위 중에 속하는 단계를 결정하여 일사값을 조도값으로 환산하는 발광효율 모델의 불연속 함수를 계산하게 된다. 변환함수는 결정된 단계의 계수를 선택하여 외부 직달조도와 확산조도를 계산하는데 사용된다.

3.2.2 천공 휘도분포의 계산

실제 천공 상태에서 직사일광을 제외한 청천공에서 담천공에 이르는 여러가지 다양한 천공상태의 휘도분포를 예측하기 위해서, 천정의 휘도를 계산하고 천공의 상대 휘도비를 계산해서 방위각과 천정각에 따른 천공의 휘도를 계산할 수 있다.

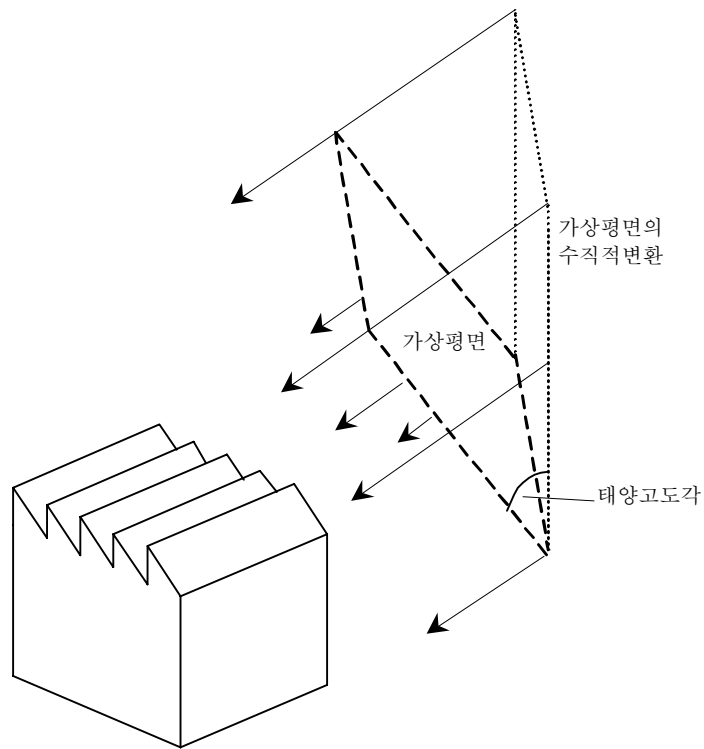
천정의 휘도를 계산하기 위하여 실험적으로 유추된 천정 휘도함수를 적용하였다. 여기서 필요한 입력 데이터는 수평면 확산일사, 태양의 천정각, 천공의 밝기(Δ)가 필요하다.

천공의 상대 휘도비를 계산하기 위해서는 태양과 예측점 사이의 각(γ)과 예측점의 천정각(ξ)이 필요하다. 결국 천정휘도와 천공의 상대 휘도비를 이용하여 예측점의 휘도를 계산할 수 있다.

3.3 직사일광에 의한 실내 조도 분포 계산

직사일광에 의한 실내 조도 분포를 계산하기 위해서는 먼저 직사일광 광자의 발생위치, 진행방향, 광자의 개수, 크기 등을 결정해야 한다. 광자의 진행 방향은 계산된 태양의 고도 및 방위각을 벡터화 함으로써 쉽게 얻을 수 있지만 나머지 조건들을 결정하기 위해서는 여러 가지 방법들이 고안될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해서 임의의 가상적 평면을 설정하여 이 평면의 범위 내에서 직사일광의 광자를 발생시키는 방법을 이용하였다. 가상적 평면의 법선벡터는 직사일광 방향과 일치하며 직사일광의 방향에서 투영했을 때 입력된 평면들을 모두 포함하는 최소한의 범위를 유지해야 한다. 이 평면의 위치는 입력된 평면들보다 직사일광 벡터방향의 가장 반대쪽에 있어야 한다. [그림 3.3.1]은 입력된 평면과 가상적 평면의 개념을 보인 것이다.



[그림 3.3.1] 계산 대상 아트리움과 광자 발생용 가상 평면

가상평면을 설정하기 위해서 우선 평면 입력 데이터의 x, y, z 축의 최대값과 최소값을 계산하여 입력 데이터의 범위 및 크기를 결정하게 된다. 이 값들의 각각의 모서리들을 연결하면 육면체 형태로 나타나게 된다. 육면체 각각의 꼭지점을 지나고 방향은 직사일광 벡터의 반대방향의 벡터를 계산해서 직사일광 벡터를 법선벡터로 하는 평면과 만나는 점을 찾을 수 있다. 교차점을 계산하여 가상평면의 범위를 결정하게 된다. 직사일광 조도를 계산하기 위한 컴퓨터 모델의 내용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Value}_{\max} &= \text{MAX}(\text{Value}_{\text{pre_max}}, \text{Value}_{\text{input}}) \\
 \text{Value}_{\min} &= \text{MIN}(\text{Value}_{\text{pre_min}}, \text{Value}_{\text{input}}) \\
 x'_p &= \sin(Z) * \cos(A) \\
 y'_p &= \sin(Z) * \sin(A) \\
 z'_p &= \cos(Z) \\
 d_i &= (x' * x_{\text{vertex}} + y' * y_{\text{vertex}} + z' * z_{\text{vertex}}) * (-1)
 \end{aligned}$$

$$r_i = \{x' * X_{\text{vertex}} + y' * Y_{\text{vertex}} + z' * Z_{\text{vertex}} + d_i\}$$

$$Y_{\text{node}} = Y_{\text{vertex_cube}} + y' * r_i$$

$$Z_{\text{node}} = Z_{\text{vertex_cube}} + z' * r_i$$

$$h_{\text{vv}} = \text{SQRT}\{(Z_{\text{Max_vp}} - Z_{\text{Min_vp}})^2\} / \cos(h)$$

$$F_{\text{direc_pho}} = A_{\text{vp}} * E_{\text{dN}}$$

$$f_{\text{direc_pho}} = F_{\text{direc_pho}} / N_{\text{direc_pho}}$$

직사일광 광자의 발생위치:

$$X_{\text{coord}} = (X_{\text{Max_vp}} - X_{\text{Min_vp}}) * \text{RAND}() / 32767 + X_{\text{Min_vp}}$$

$$Y_{\text{coord}} = (Y_{\text{Max_vp}} - Y_{\text{Min_vp}}) / (X_{\text{Max_vp}} - X_{\text{Min_vp}}) * X_{\text{coord}} + Y_{\text{Max_vp}} - X_{\text{Max_vp}} * (Y_{\text{Max_vp}} - Y_{\text{Min_vp}}) / (X_{\text{Max_vp}} - X_{\text{Min_vp}})$$

$$Z_{\text{coord}} = h_{\text{vv}} * \text{RAND}() / 32767 + Z_{\text{Min_vp}}$$

광자가 평면에 입사하는 조건식:

$$\text{IF} (x'_p * x'_n + y'_p * y'_n + z'_p * z'_n) < 0$$

$$X_{\text{node}} = X_{\text{emit}} + x'_n * r$$

$$Y_{\text{node}} = Y_{\text{emit}} + y'_n * r$$

$$Z_{\text{node}} = Z_{\text{emit}} + z'_n * r$$

$$\text{IF} \{(X_{\text{node}} - X_{\text{emit}}) * x'_p + (Y_{\text{node}} - Y_{\text{emit}}) * y'_p + (Z_{\text{node}} - Z_{\text{emit}}) * z'_p\} > 0$$

$$\text{IF} \{(X_{\text{node}} - X_{\text{vertex}_1}) * (X_{\text{node}} - X_{\text{vertex}_4}) + (Y_{\text{node}} - Y_{\text{vertex}_1}) * (Y_{\text{node}} - Y_{\text{vertex}_4}) + (Z_{\text{node}} - Z_{\text{vertex}_1}) * (Z_{\text{node}} - Z_{\text{vertex}_4})\} \leq 0$$

$$x_{\text{vector}} = (XYZ_{\text{vertex}_1} - XYZ_{\text{node}}) / r$$

$$z_{\text{vector}} = V_{\text{normal}} / r$$

$$y_{\text{vector}} = z_{\text{vector}} \times x_{\text{vector}}$$

$$\theta_{\text{node}} = \tan^{-1}[\text{SQRT}\{(X_{\text{node}})^2 + (Y_{\text{node}})^2\} / Z_{\text{node}}]$$

$$\phi_{\text{node}} = \tan^{-1}(Y_{\text{node}} / X_{\text{node}})$$

$$\text{IF}(\text{확산면}) \quad \gamma_{\text{new}} = \sin^{-1}\{\text{RAND}() / 32767\}$$

$$\text{IF}(\text{경면}) \quad \gamma_{\text{new}} = \theta_{\text{photon}}$$

$$\text{IF}(\text{확산면}) \quad \phi_{\text{new}} = \text{RAND}() / 32767 * 2 * \pi$$

$$\text{IF}(\text{경면}) \quad \phi_{\text{new}} = \phi_{\text{photon}} * \pi$$

$$X_{\text{new}} = \{\sin(\theta) * \cos(\phi)\} * r$$

$$Y_{\text{new}} = \{\sin(\theta) * \sin(\phi)\} * r$$

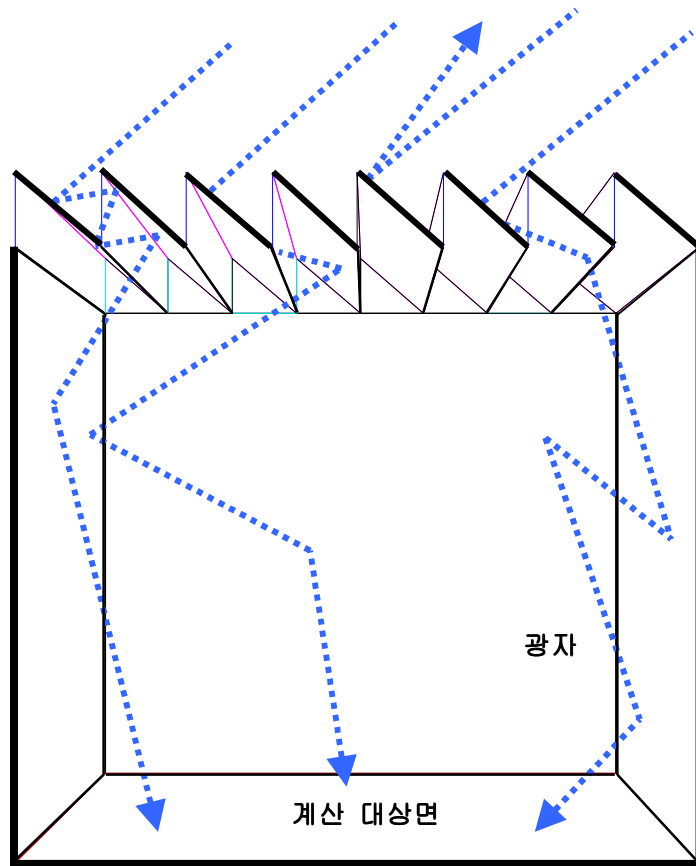
$$Z_{\text{new}} = \cos(\theta) * r$$

Z_{Max_vp} : 가상평면의 z 최대값 Z_{Min_vp} : 가상평면의 z 최소값
 x'_n, y'_n, z'_n : 평면 법선 벡터의 x, y, z 축 방향여현
 $X_{emit}, Y_{emit}, Z_{emit}$: 광자발생위치의 x, y, z 좌표
 $X_{vertex_1}, Y_{vertex_1}, Z_{vertex_1}$: 평면의 첫번째 꼭지점의 x, y, z 좌표
 $X_{vertex_4}, Y_{vertex_4}, Z_{vertex_4}$: 평면의 네번째 꼭지점의 x, y, z 좌표
 $X_{vector}, Y_{vector}, Z_{vector}$: 평면에 대한 x, y, z 축 벡터
 XYZ_{vertex_1} : 평면 첫번째 꼭지점의 좌표
 XYZ_{node} : 광자와 평면의 교점
 V_{normal} : 평면의 법선벡터
 θ_{node} : 평면에 대한 광자의 입사각
 ψ_{node} : 평면에 대한 광자의 방위각
 γ_{new} : 광자의 새로운 반사각 θ_{photon} : 광자의 입사각
 ψ_{new} : 광자의 새로운 방위각 ψ_{photon} : 광자의 방위각
 $X_{new}, Y_{new}, Z_{new}$: 새로운 좌표
 $x'_{new}, y'_{new}, z'_{new}$: 새로운 벡터의 방향여현
 x'_{x_Axis} : x 축의 x 방향여현 y'_{y_Axis} : y 축의 y 방향여현
 z'_{z_Axis} : z 축의 z 방향여현 x'_{y_Axis} : x 축의 y 방향여현
 y'_{z_Axis} : y 축의 z 방향여현 z'_{x_Axis} : z 축의 x 방향여현
 x'_{z_Axis} : x 축의 z 방향여현 y'_{x_Axis} : y 축의 x 방향여현
 z'_{y_Axis} : z 축의 y 방향여현
 ☆RAND () 는 1~32767 사이의 어떤 정수값을 갖는 함수

가상평면이 설정되면 가상평면을 수직적으로 변환하여 평면의 범위 내에서 광자의 발생위치 x, y, z 를 쉽게 구할 수 있다. 난수를 이용하여 가상평면에서 광자 발생위치를 결정하게 되는데 가상평면은 태양의 고도에 따라 기울어져 있는 평면이 될 것이다. 계산과정을 단순하게 하기 위해서 가상평면을 수직으로 세워서 난수로 x 와 z 축의 발생위치를 결정하면 쉽게 광자의 x, y, z 축의 좌표를 계산할 수 있다. 가상평면의 크기가 결정되면 직사일광 조도를 이용하여 가상평면에서 나오는 총 광자의 세기를 결정한다. 광자의 개수를 결정하면 총 광자의 세기를 광자수로

나누어 광자 한 개당 세기가 결정된다. 광자의 개수와 광자의 세기가 결정되면 가상평면의 범위 내에서 난수를 이용하여 발생위치를 결정하고 광자를 발생시킨다.

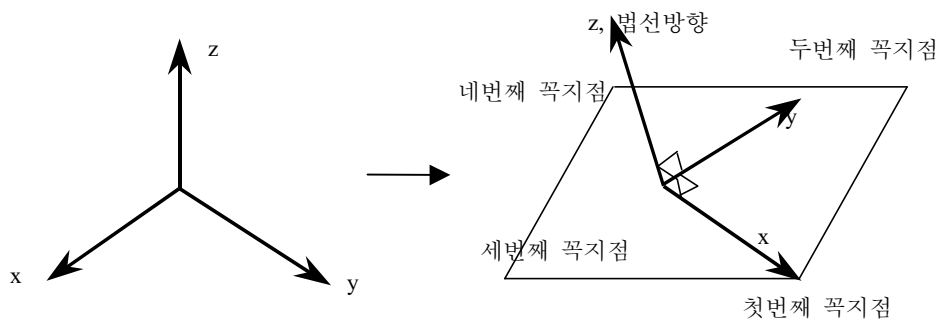
발생된 광자에 대해서 제 2 장에서 언급한 광자와 평면이 만날 조건이 성립하는지를 검사하게 된다. 만약 모든 평면에 광자가 입사하지 않는 경우에 이 광자는 소멸시키고 가상평면에서 다음 광자를 발생시킨다. 검사 조건을 만족하는 것 중 광자의 발생위치에서 광자가 평면에 도달한 위치까지의 길이가 가장 짧은 것을 광자가 입사하는 평면으로 채택하고 이 평면에 광자의 누적 입사 횟수를 계산한다. [그림 3.3.2]는 튕날형 아트리움 창호를 통해 입사하는 광자의 개념을 보인 것이다.



[그림 3.3.2] 직사일광 조도를 계산하기 위한 광자의 개념

평면에 입사된 광자는 또 다른 새로운 방향으로 진행하게 되는데 먼저 재료의

반사율과 투과율에 따라 광자의 소멸 여부를 결정하게 된다. 소멸되지 않은 광자의 벡터는 입사각과 반사각을 결정하기 위해서 일반 직교 좌표계에서 평면의 극좌표계로 변환해야 하는데 우선 일반 직교 좌표계는 광자가 입사되는 평면의 교점으로 이동하게 된다. 그리고, 이동한 일반 직교 좌표계는 광자가 입사되는 평면의 직교 좌표계로 회전하게 된다. 평면의 직교 좌표계에서 x 축은 입력된 평면의 꼭지점 중 첫번째 지점을 끝점으로 선택하고 광자와 평면이 교차한 지점을 시작점으로 시작하여 x 축의 방향여현을 구할 수 있다. z 축의 방향여현은 평면의 법선벡터의 방향여현과 동일하게 설정한다. y 축의 방향여현은 벡터의 외적을 이용하여 z와 x의 외적을 계산하여 이것을 y 축의 방향여현으로 선택하게 된다. [그림 3.3.3]는 일반 직교 좌표계를 특정 평면의 직교 좌표계로 변화하는 것을 보인 것이다.



[그림 3.3.3] 일반 좌표계에서 특정 평면의 직교좌표계로 변환

평면내의 직교 좌표계를 극좌표계로 변환하여 광자의 방향벡터를 입사각과 방위각으로 변환할 수 있다. 입사각이 결정되면 투과 및 반사특성에 따르는 반사각을 결정하여 새로운 광자의 방향이 만들어지게 된다. 새로운 방향의 반사각과 방위각은 평면의 극좌표계에서 평면의 직교좌표계로, 다시 일반 직교좌표계로 변환하면서 새로운 x, y, z 방향벡터로 변환하게 된다. 새로운 방향벡터를 가진 광자는 다른 평면에 입사하는지를 다시 검사하게 된다. 이 과정은 광자가 소멸될 때 까지 계속 된다. 직사일광의 광자가 모두 발생되어 모두 소멸한 후에는 계산 대상면에 입사된 광자의 총 개수를 계산하여 직사일광에 의한 계산 대상면의 조도를 구할 수 있다.

3.4 확산 천공광에 의한 실내 조도 분포 계산

확산 천공광에 의한 실내 조도 분포를 계산하기 위해서는 직사일광의 경우와 같이 광자의 발생위치, 진행방향과 광자의 개수와 크기를 먼저 결정해야 한다. 하지만 확산 천공광의 경우, 천공에서 광자의 발생위치, 진행방향 등을 결정하는데에 어려움이 있기 때문에 계산 대상면에서 광자를 발생시켜 외부 천공에 도달한 광자를 선택하여 발생된 계산 대상면의 위치에 광자가 외부 천공에서 창호를 통과하여 도달한 것으로 간주할 수 있다. [그림 3.4.1]은 계산 대상면에서 광자를 발생시켜 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 휘도 분포에 따라 외부 천공에 도달한 광자에 가중치를 주어 천공의 휘도 분포에 따른 영향을 계산할 수 있다. 광자가 모두 발생되었으면 계산 대상면에 들어온 광자의 개수를 계산하여 확산 천공광에 의한 계산 대상면의 실내 조도를 구할 수 있다. 확산천공광에 의한 조도를 계산하기 위한 컴퓨터 모델은 아래와 같다.

```

Fdiffu_pho = A_target * E_dH
fdiffu_pho = Fdiffu_pho / N_dH
Weight = IF(l_v_decimal > RAND( ) / 32767) Weight + 1
fLv      = fdiffu_pho * Weight
N_dH     = IF(Weight > 1) N_dH - Weight + 1

```

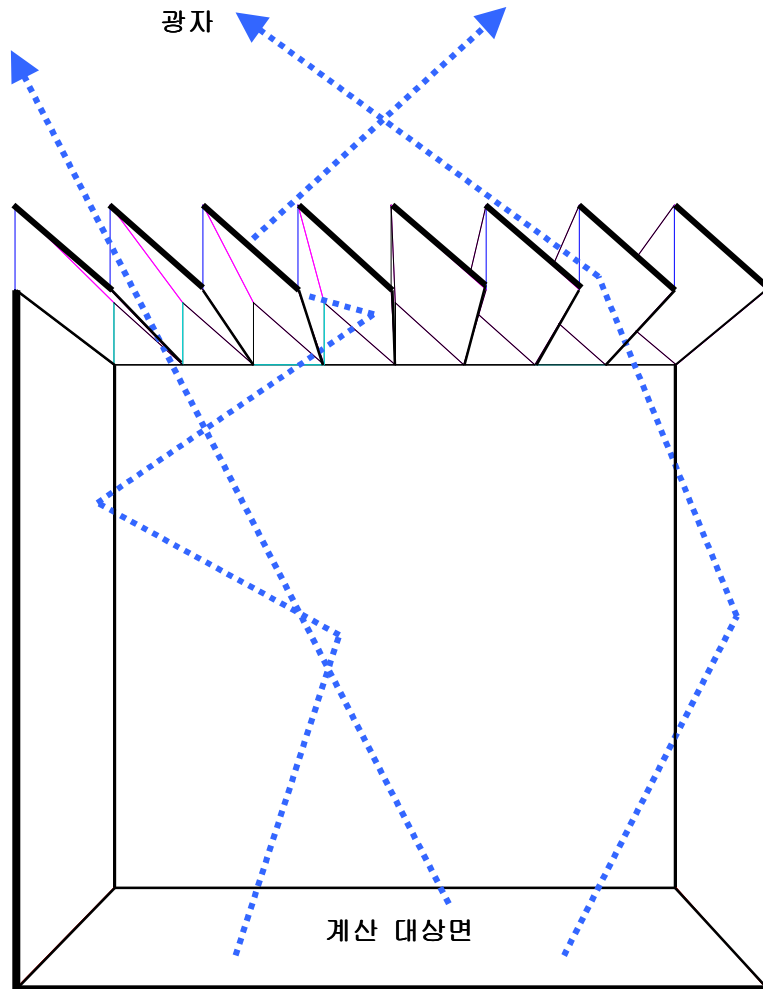
여기서, F_{diffu_pho} : 확산천공광 총 광자의 세기 A_{target} : 계산대상면의 면적

E_{dH} : 확산조도

f_{diffu_pho} : 확산천공광 1 개당 광자의 세기

N_{dH} : 확산 천공광 광자의 개수 $Weight$: 가중치

$l_{v_decimal}$: 천공 휘도비의 소수부분



[그림 3.4.1] 확산 천공광 조도를 계산하기 위한 광자의 개념