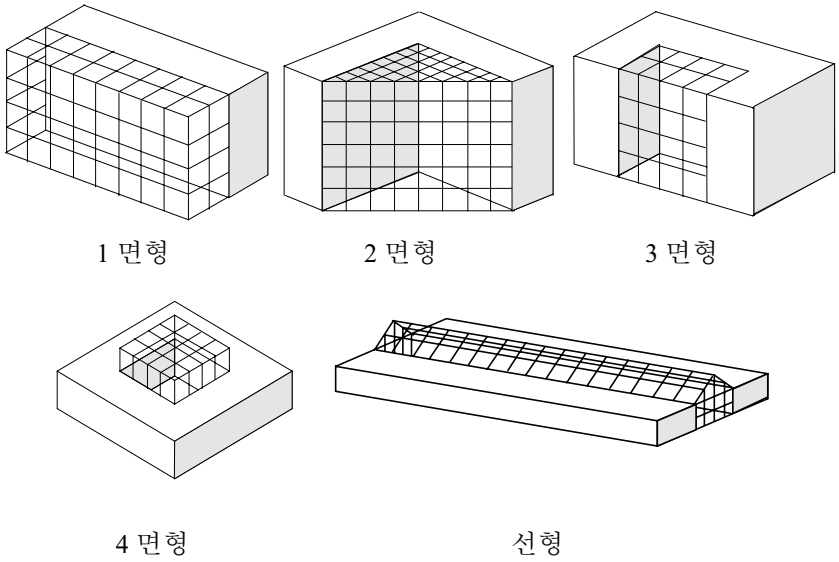
제 2 장 기본 이론

2.1 아트리움내 공간조도에 관련한 주요 변수

3 면형 아트리움내 공간조도를 결정하는 주요 변수로는 아트리움의 형태, 아트리움의 방위, 광정지수(Well Index), 아트리움 천정 창호의 투과특성, 그리고 내부 마감재의 반사특성 등이 있다.

2.1.1 아트리움의 형태

아트리움 형태는 일반적으로 단순형과 복합형으로 나눌 수 있다. 단순형 아트리움으로는 1 면형, 2 면형, 3 면형, 4 면형, 선형 아트리움으로 나눌 수 있다. 복합형 아트리움으로는 가교형, 기단형, 복수 수평형, 복수 수직형 아트리움으로 나눌 수 있다. 그러나 본 연구에서는 여러 아트리움 중에서 가장 일반적인 사무소 건물에서 사용되는 아트리움 형태인 3 면형 아트리움으로 제한하였다. **[그림 2.1.1]**은 단순형 아트리움의 예를 보인 것이다.

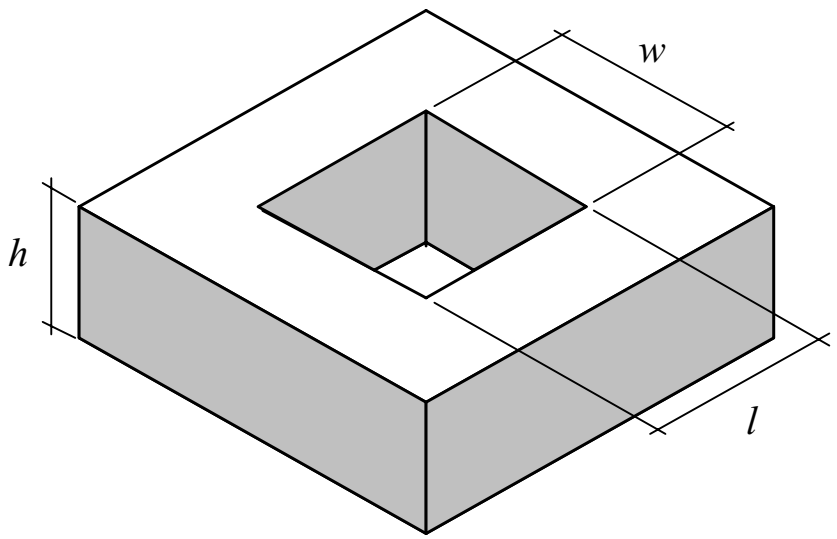


[그림 2.1.1] 아트리움의 형태(Bednar,1986)

2.1.2 광정지수(Well Index)

아트리움의 기하학적 비례를 수치적으로 나타내는 것으로서 평면비(PAR, Plan Aspect Ratio), 단면비(SAR, Section Aspect Ratio) 및 광정지수(WI, Well Index) 등이 있다. PAR 은 길이 대 너비의 비율을 말하며, SAR 은 높이 대 너비의 비율을 말하며, 둘 다 2 차원적인 비례를 나타낸다. 반면에 WI 는 바닥면적에 대한 높이의 상대비율의 3 차원적인 비례를 보여준다. 따라서 본 연구에서는 빛의 방향을 평가하기 위해서 아트리움의 깊이를 나타낼 때 WI 를 사용하였다. **(식 2.1.1)**은 아트리움의 깊이를 나타내는 광정지수(WI)를 구하는 식으로서 **[그림 2.1.2]**와 같은 아트리움에 적용시킬 수 있다.

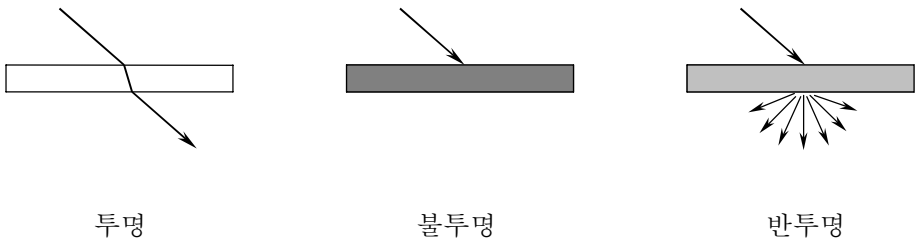
$$WI = \frac{(W + L) \times H}{2 \times (W \times L)} \qquad \textbf{(식 2.1.1)}$$



[그림 2.1.2] 광정지수(Well Index)(Saxon,1987)

2.1.3 아트리움 천정의 투과특성 및 방위

3 면형 아트리움 천정의 창호 형태는 평면형, 피라미드형, 격자형, 톱날형 등의 여러 형태를 이루고 있다. 그러나 일반적으로 3 면형 아트리움은 고층 건물의 하부층에 위치하거나, 중·저층에 위치하여 평면형의 창호형태를 가지고 있다. 이러한 평면형 창호는 **[그림 2.1.3]**과 같이 투명, 불투명, 반투명의 투과특성을 가지고 있으며 실내로 유입되는 빛의 1 차 방향을 결정하는 것으로서 실내 공간조도에 많은 영향을 준다. 3 면형 아트리움은 한쪽 벽이 유리로 처리되어 있으므로 유리벽의 방향에 따라 연중 시각별로 아트리움내로 유입되는 자연광의 방향성이 변하게 된다.



[그림 2.1.3] 재료의 투과 특성

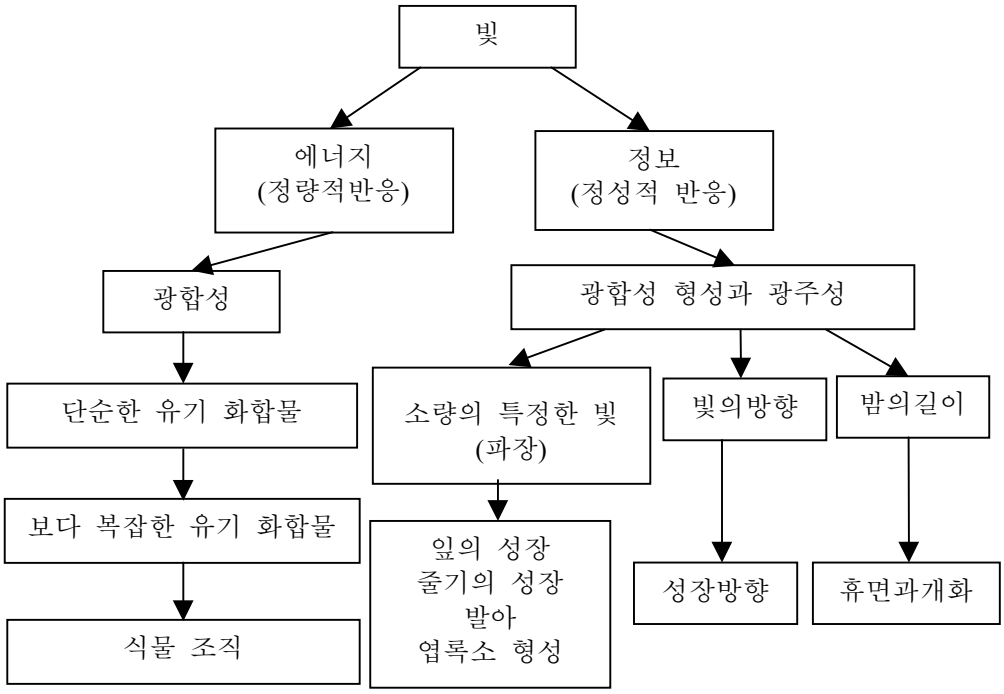
2.1.4 내부 마감재의 반사특성

아트리움 내부 표면에 입사한 빛은 표면 재료의 거칠기(Texture) 정도에 따라서 경면 또는 확산 반사하며, 재료의 명암(Darkness) 정도에 따라 반사되는 빛의 양이 결정되어지며, 이러한 변화는 아트리움 내부 공간 벡터조도의 2 차 방향을 결정하는 중요한 요인이다.

2.2 아트리움내 식재의 생장과 수형(樹形)

아트리움을 식재로 조경함으로써 얻는 효과는 다양하다. 첫째 심리적인 만족감으로 무기적(無機的) 본질에 의한 메마른 공간에 생명을 불어넣어 주는 활력소의 역할을 하며, 둘째 건축적인 기능으로서 성격이 서로 다른 공간들을 분할하여 경계를 이루어 주며, 셋째 미기후 조절기능으로 실내 기후조건을 향상시켜준다. 따라서 아트리움 내 식재를 조경한다는 것은 매우 자연스러운 발상일 것이다.

그러나 모든 아트리움이 위에서 열거한 것과 같은 긍정적인 기능만을 갖는 것은 아니다. 자연채광의 의한 충분한 공학적 근거와 사전 검토 없이 조경된 식재들은 굴광성에 의해 한쪽 방향으로의 성장을 할 것이며, 가장 효율적이며 경제적인 인공보조등의 위치를 파악하는데 어려움을 느낄 것이다. **[그림 2.2.1]**은 식물의 빛에 대한 반응을 나타낸 것이다.



[그림 2.2.1] 식물의 빛에 대한 반응(Bednar,1986)

[그림 2.2.1]과 같이 식재의 성장방향은 빛의 정성적인 반응으로서 빛의 방향에 의해 좌우됨을 알 수 있다. 일반적으로 빛은 식물에 대해 세 가지 영향을 끼친다. 생존을 위한 에너지를 공급할 뿐 아니라 계절적 자극을 주며, 또한 식물의 형태를 갖추어 준다. 뒤의 두가지는 자연계에서는 부차적인 내용이지만, 실내 환경에서는 이상 현상을 일으킬 가능성이 있다.

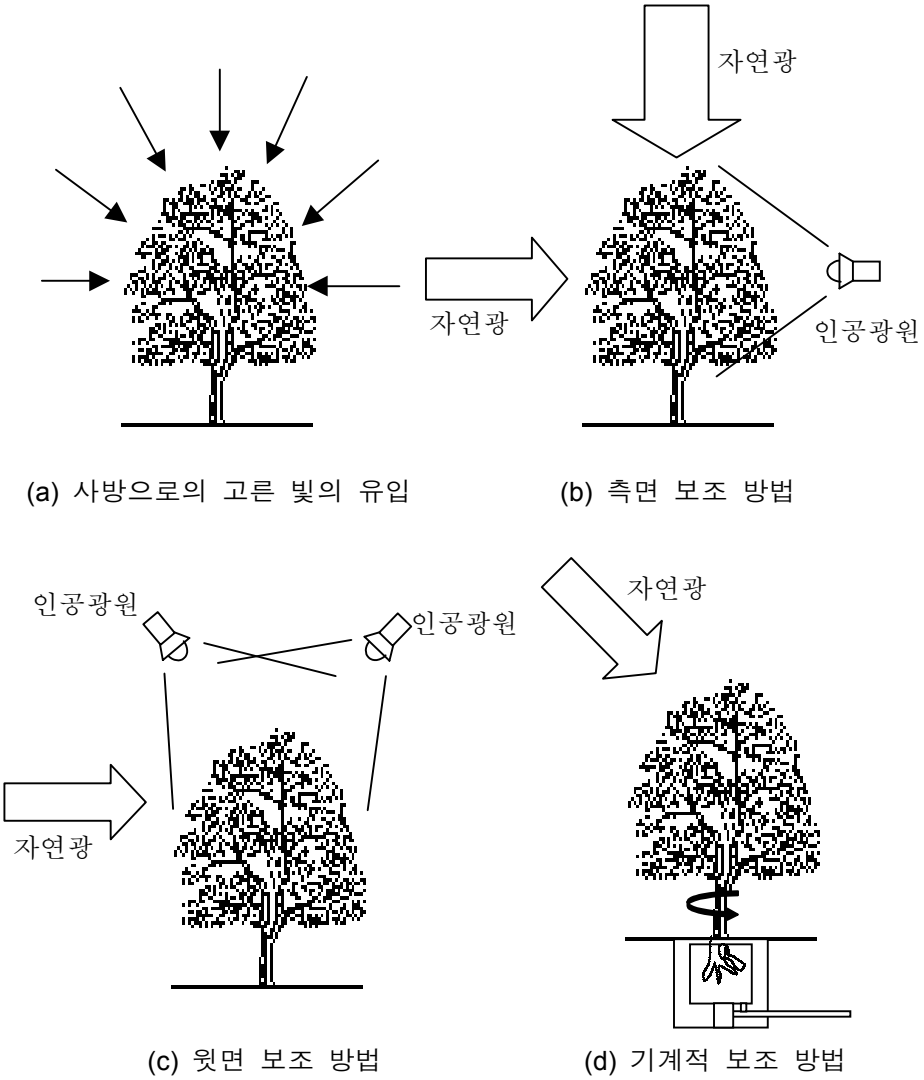
아트리움내 식재의 성장을 위해서는 빛의 절대량 확보가 최대 요건이다. 성장을 촉진시키기 위한 충분한 빛은 수목에 대해서 뿐 아니라 그 뿌리에 있는 식물에게도 도달되어야 한다. 대개 식물의 적절한 에너지 요구는 대략 하루 12 시간 동안 700~1000lx 이며, 생육을 위해 필요한 최저 한계는 12 시간 동안 500lx 이다.

그러나 자연광만으로 필요한 빛을 1 년내내 얻을 수는 없고, 때로는 필요이상한 방향으로의 자연광 유입이 이루어지는 등 아트리움 내 빛의 방향성에 대한 정량적인 분석이 이루어 지지 않는다면 아트리움내 식재의 굴광성에 의해 비대칭적인 수형(樹形)을 갖게 될 우려가 있다.

아트리움 창호는 그 방향에 따라서 유입되는 자연광의 양과 방향성에 큰 영향을 준다. 천공광은 지평 부분보다는 천정부에서 약 3 배정도 밝기 때문에, 같은 면적의 천창은 유리벽과 비교하여 2~3 배나 되는 빛을 받아들일 수 있다. 천창은 방향성이라는 점에서도 식물에게 적합하다. 식물은 빛의 자극을 받아 그 방향으로 성장하기 때문에 천창에 의한 자연채광은 **[그림 2.2.2(a)]**에서 보는 바와 같이 상부로부터 고른 빛의 유입이 이루어져 자연스러운 식물의 형태를 유지해 준다. 그러나 자연광이 어느 한 방향으로부터만 주로 유입할 경우에는 아래와 같은 방법으로 대처할 수도 있다.

옆에서 오는 한 방향의 빛인 경우도 물론 식재의 성장에 도움이 되기도 하지만, **[그림 2.2.2(b)]**와 같이 인공 조명을 준비하여 부족되는 빛을 보상해 줄 필요가 있다. 그러나 위쪽에서 보조광이 필요한 경우에는 **[그림 2.2.2(c)]**와 같이 복수의 광원을 중심에서 빗나가게 비추는 것이 단일의 수직광보다 바람직하다. 또 하나의 방법은 **[그림 2.2.2(d)]**와 같이 수목이 담긴 피트를 회전시켜 수목이 측면 방향으로부터의 자연광을 받을 수 있도록 해 주는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법들도 유입되는 빛의 양과 방향성을 알 수 있는 정량적인 분석이 선행된다면 보다 효율적으로

실내 공간상의 빛의 방향에 대한 수형(樹形)을 유지시킬 수 있을 것이다.



(a) 사방으로의 고른 빛의 유입 (b) 측면 보조 방법

(c) 윗면 보조 방법 (d) 기계적 보조 방법

[그림 2.2.2] 아트리움내 식재의 수형(樹形)을 적절히 유지시키는 방법

2.3 공간조도

2.3.1 공간조도의 개념

조명 조건은 보통 주어진 평면상, 그것도 흔히 수평의 작업면(책상)상의 조도를 중심으로 기술, 측정 또는 규정되나, 수직 또는 경사면상의 조도를 문제삼을 때도 있다. 다시 말하면 일반적으로 조도는 (평)면조도(Planar Illuminance)를 가르킨다.

그러나 이것은 조명 조건을 완전히 기술하는 것은 아니다. 주어진 조도는 하나의 특정 방향으로부터 오는 광선에 의해 생길 수도 있고, 또는 모든 방향으로부터 오는 광선에 의해 생길 수도 있다. (평)면조도계(Planar Light-meter)는 반구면으로부터 오는 광선만 기록하고 좁은 대역의 광선과 확산장을 구분하지 못한다.

평균구면조도는 모든 방향으로부터 작은 구(球)가 받는 평균 조도이다. 즉 구(球)에의 전입사광속을 구(球)의 표면적으로 나눈 값이다. 이 값을 E_s라 하며 lux 로 측정된다. 따라서 E_s는 그 방향에 관계없는 전광량의 척도이다.

조도벡터는 크기와 방향을 갖는 합성량이다. 그 크기는 작은 구면상의 서로 반대편에 있는 두 점 간의 조도의 최대차이다. ΔE_{max}로 표시되며 lux 로 측정된다. 그 방향은 최대차가 측정된 두 점을 연결하는 직경에 의해 구해진다. 이 방향은 2 개의 각을 중심으로 정의될 수 있다. 즉 하나는 편리한 기준 방향으로부터 측정한 수평각이고, 다른 하나는 수평으로부터 측정한 수직각이다.

벡터/스칼라 비는 빛의 방향성의 척도로서 조각 등의 입체감을 표시하는데 좋은 지표가 된다. ΔE_{max} / E_s = 4 일 경우는 완전한 단일 방향의 빛이다. 실제로 이 값은 항상 4 이하이다. 0 은 완전 확산의 전방향의 빛을 가리킨다.

만약 구에의 전입사광속이 Φ라면, 구면의 평균조도(스칼라)는,

$$Es = \frac{\Phi}{4\pi r^2} \qquad \textbf{(식 2.3.1)}$$

만약 이 모든 광속이 한 방향으로부터 온다면, 벡터의 크기는,

$$\Delta E_{\max} = \frac{\Phi}{\pi r^2} - 0 = \frac{\Phi}{\pi r^2} \qquad \textbf{(식 2.3.2)}$$

따라서 가능한 최대의 벡터/스칼라 비는,

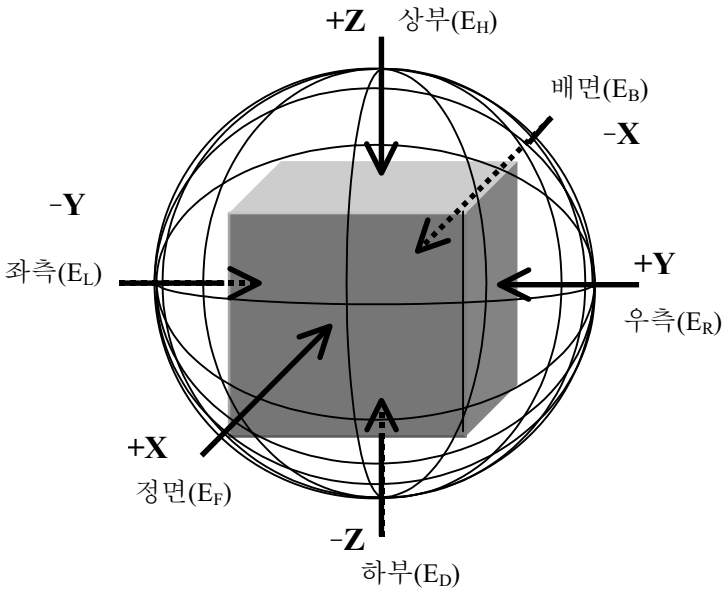
$$\frac{\Delta E_{\max}}{E_s} = \frac{\Phi}{\pi r^2} \div \frac{\Phi}{4\pi r^2} = 4 \qquad \textbf{(식 2.3.3)}$$

균일한 확산장에서 $\Delta E_{max}=0$ 이다. 따라서 벡터/스칼라 비는 $0/E_s=0$ 이다. 따라서 벡터/스칼라의 비는 항상 0~4 의 범위에 있음을 알 수 있다(Szokolay,1980).

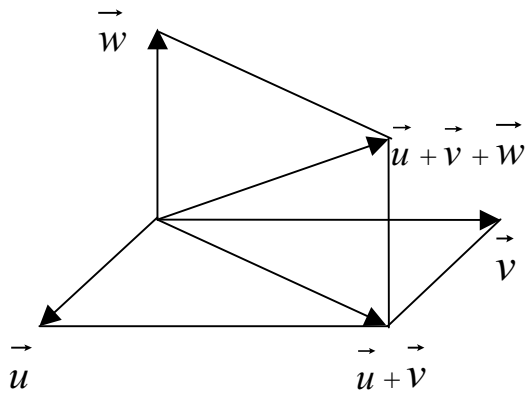
2.3.2 공간조도의 계산법

일반적으로 공간조도는 공간조도계를 이용한 공간내 벡터와 스칼라의 양을 측정하고 그 비를 벡터의 방향과 함께 도식화하여 나타낼 수 있다. 그러나 이러한 측정방법은 인공조명을 이용한 실제 건물내에서 이루어지므로 시시각각으로 변하는 태양 고도와 방위각의 변화에 따른 측정이 불가능하고, 축소모형에 의한 사전평가가 어려웠다.

따라서 본 연구에서는 아트리움내 3 차원 공간 조도값을 측정하기 위하여 **[그림 2.3.1]**과 같이 단위공간을 정육면체의 6 방향으로 나눈 뒤 서로 대칭되는 값의 차를 이용한 3 차원 벡터로서 표현하였다. 우선 단위 공간내로 입사되는 총광속을 육면체의 표면적으로 나누어 평균조도(스칼라조도)를 구하고, 6 방향으로부터 입사하는 빛의 조도값을 각각 스칼라조도로 나누어 **[그림 2.3.2]**에 보인 $\vec{u}$, $\vec{v}$, $\vec{w}$의 크기를 결정한다. 그리고 $\vec{u}$, $\vec{v}$, $\vec{w}$를 벡터의 가법에 의해 그 지점에서의 최종 벡터인 $\vec{u}+\vec{v}+\vec{w}$의 방향와 크기를 결정한다.



[그림 2.3.1] 공간조도의 개념



[그림 2.3.2] 벡터의 가법

예를 들면 정면에서 100lx, 우측면에서 200lx, 배면에서 300lx, 좌측면에서 400lx, 상부면에서 500lx, 하부면에서 600lx 의 조도값을 가진다면 단위 공간내로 입사하는 총광속은 100+200+300+400+500+600=2100lx 가 되며, 이를 각 방향의 조도로 나누면 각 방향으로의 단위 벡터가 된다. 이를 **[그림 2.3.1]**과 같이 X, Y, Z 축으로 나누어 방향에 따른 부호를 붙이면 각 단위벡터는 다음과 같다

정면으로의 단위벡터	: 100/2100= +0.05(X 축)
우측면으로의 단위벡터	: 200/2100= +0.1(Y 축)
배면으로의 단위벡터	: 300/2100= −0.14(X 축)
좌측면으로의 단위벡터	: 400/2100= −0.19(Y 축)
상부면으로의 단위벡터	: 500/2100= +0.24(Z 축)
하부면으로의 단위벡터	: 600/2100= −0.29(Z 축)

따라서 벡터의 가감에 의해 정리해 보면 X, Y, Z 축의 단위벡터는 다음과 같다.

X 축의 단위벡터	: + 0.05 − 0.14 = − 0.09
Y 축의 단위벡터	: + 0.1 − 0.19 = − 0.09
Z 축의 단위벡터	: + 0.24 − 0.29 = − 0.05

그리고 스칼라조도(평균조도)는 총광속을 입사되는 6 면으로 나누어 계산하면 2100/6=350lx 가 된다.

2.4 몬테카를로 방법(Monte Carlo Method)

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

(1) 난수 발생

몬테카를로 방법을 이용하는데 있어서 가장 중요하게 고려되어져야 할 부분 중의 하나는 분포가 균일한 난수를 발생시키는 것이다. 난수 발생에서 고려해야 할 점들은 무작위성과 균일성을 갖는 좋은 분포, 긴 주기, 재생가능성, 계산하는데 있어서 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(1948)가 처음 사용한 이래 거의 표준적으로 사용되

어 왔고 가장 좋은 방법으로 알려져 있다. 어떤 정수 S_i가 주어졌을 때 이 수열은 **(식 2.4.1)**과 같다.

$$S_{i+1} = (aS_i + c) \bmod m \qquad \textbf{(식 2.4.1)}$$

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

(2) 주어진 확률 분포에 따른 난수 발생 방법

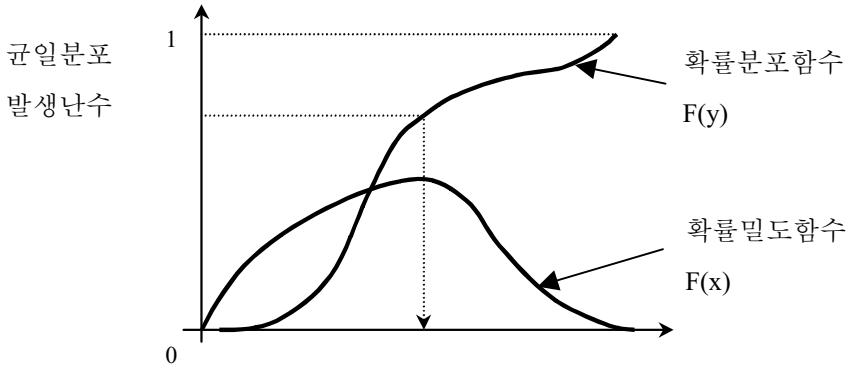
위와 같은 방법으로 균일 확률 분포를 갖는 난수 발생기를 만들었으면 그것을 이용하여 재료의 특성에 따른 확률 분포를 갖도록 변화시켜야 한다. 변환 방법으로는 일반적으로 역변환 방법(Inverse Transformation Method)과 거부법(Rejection Method)이 사용된다(김재삼,1997).

- 역변환방법(Inverse Transformation Method)

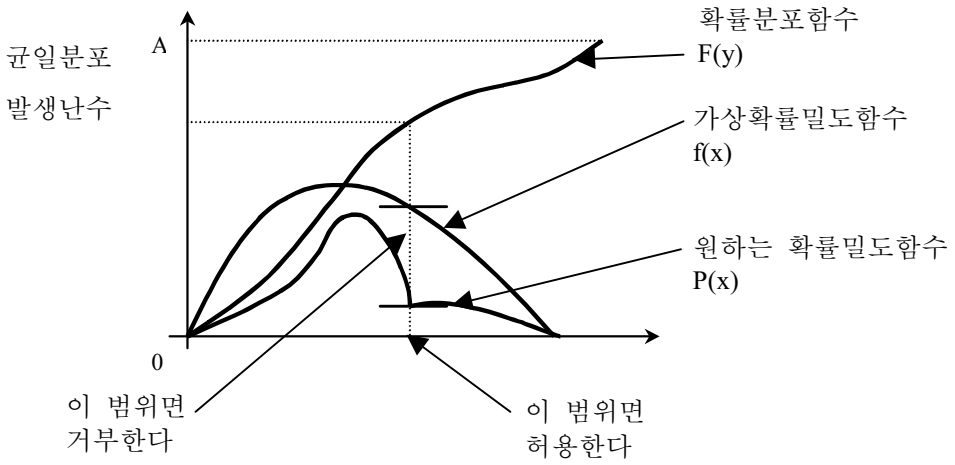
역변환 방법은 원하는 확률 밀도 함수의 적분값인 확률 분포 함수를 구하고 그리고 이 함수의 역함수를 구하여 균일 확률 분포 함수를 변환시키면 원하는 확률 분포를 갖는 난수열을 만들 수 있는 방법이다. **[그림 2.4.1]**은 이 방법의 개념을 보인 것이다. 이 방법은 역함수를 쉽게 구할 수 있다면 가장 효율적인 방법이 될 수 있겠지만 실제적으로는 그렇지 못한 경우가 대부분이기 때문에 실제 적용에는 비효율적인 방법이 된다.

- 거부법(Rejection Method)

거부법은 역함수를 구하지 않고도 원하는 분포의 난수열을 발생시킬 수 있는 방법이다. **[그림 2.4.2]**에 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.



[그림 2.4.1] 역변환 방법에 의한 난수발생



[그림 2.4.2] 거부법에 의한 난수발생

2.5 광선추적기법(Ray-tracing Technique)

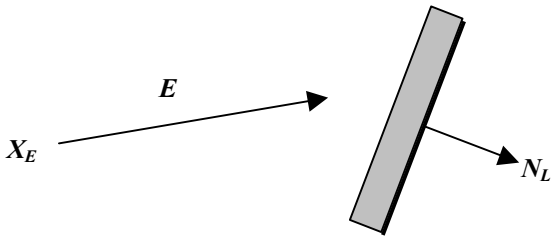
광선추적기법은 광자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화시켜 공간 내에서 광자의 운동 경로를 수학적으로 예측할 수 있는 기법이다. 따라서 이 방법을 문제해결에 적용시키기 위해서는 벡터에 대한 기본적인 이론을 이해하고 이 벡터가 공간상의 어떤 평면과 만날 경우 만나는 점의 교점과 이루는 각 등을 계산하는 식을 알아야 한다. 교차한 면에 대한 반사 특성, 투과 특성 등과 같은 벡터의 방향이나 크기에 변화를 줄 수 있는 요인 등을 고려하여 벡터의 새로운 방향과 크기를 결정하게 된다.

2.5.1 광자와 공간의 평면이 만날 조건

광자가 재료의 표면에 의해 반사, 흡수, 굴절되는 것을 시뮬레이션하기 위해서 우선 광자가 재료의 표면에 입사하는지의 여부를 검사하여야 한다.

(1) '광자의 방향과 표면의 방향이 반대인가?'에 대한 검사

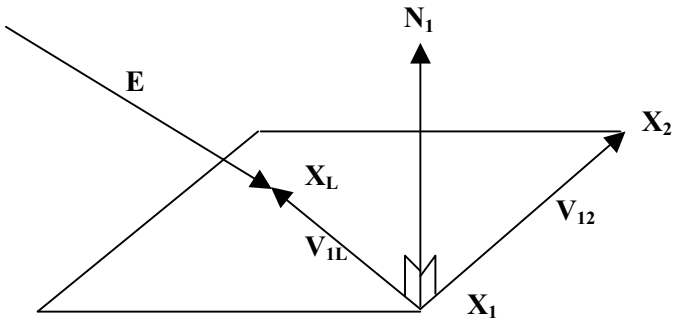
[그림 2.5.1]에서 X_E는 광자의 발생점, E는 방향성분, N_L은 평면의 법선 벡터를 나타내며, 조건식은 $E \bullet N_L > 0$ 이 된다. 그래서 이 값이 성립하면 광자가 계산 대상 평면을 향하지 않고 있다는 것을 의미한다.



[그림 2.5.1] 광자의 방향과 표면의 방향 검사

(2) ‘평면의 면적 안에 광자가 들어오는가?’에 대한 검사

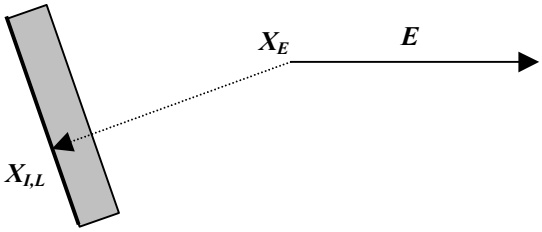
[그림 2.5.2]에서 X_L는 평면과 광자의 교점, V_{IL}는 평면의 첫 번째 꼭지점 X_1를 시작점, 교점 X_L를 끝점으로 하는 벡터, V_{12}는 첫 번째 꼭지점 X_1을 시작점, 두 번째 꼭지점 X_2를 끝점으로 하는 벡터, N_1은 $V_{12} \times V_{1L}$ 의 값으로, 꼭지점들의 법선 벡터 N과 광자의 방향 벡터 E의 관계에서 조건식은 $N_i \bullet E > 0$ (i = 꼭지점 번호)가 된다. 그래서 모든 꼭지점에서 조건식을 검사하여 조건식을 만족하는 경우가 발생하면 광자는 평면의 범위안에 들어오지 않는 것을 알 수 있다.



[그림 2.5.2] 광자가 평면의 범위안에 들어오는가를 검사

(3) ‘표면이 광자가 발생된 지점의 뒤쪽에 있지는 않은가?’ 에 대한 검사

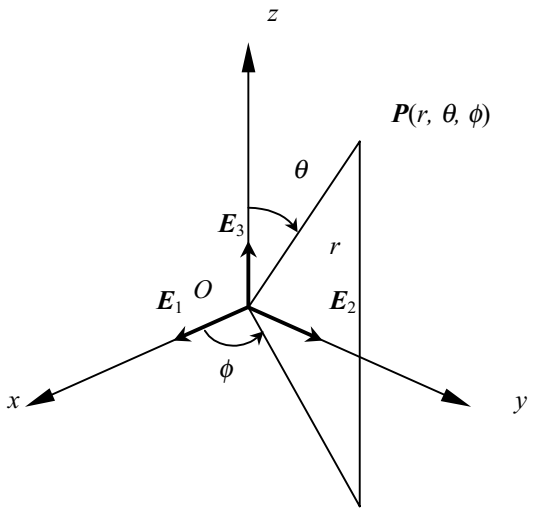
[그림 2.5.3]에 보인 것과 같이 $(\boldsymbol{X_{I,L}} - \boldsymbol{X_E}) \bullet \boldsymbol{E} < 0$ 일 경우 광자의 출발점이 평면의 뒤쪽에 있음을 알 수 있다. 여기서 $\boldsymbol{X_E}$는 입자의 발생점, $\boldsymbol{X_{I,L}}$은 평면과 만나는 교점, $\boldsymbol{E}$는 입자의 방향성분 벡터가 된다. 따라서 위 식을 만족하면 계산에서 제외될 수 있다.



[그림 2.5.3] 평면이 광자의 출발점 뒤에 있는지의 검사

2.5.2 반사 또는 투과되는 광자의 새로운 벡터 계산

우리가 일반적으로 쓰는 벡터는 *x, y, z* 를 축으로 하는 직교좌표계를 사용한다. 그러나 입사각, 반사각 등 어떤 각도를 이용해 그 점의 위치나 벡터의 방향을 알아야 할 경우 좌표계를 원주좌표계나 극좌표계로 변환시켜야 한다. 극좌표는 **[그림 2.5.4]**와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2.5.4] 극좌표계

점 ***P*** 의 직교좌표 (*x, y, z*)와 극좌표 (r, *θ, ϕ*) 사이에는 **(식 2.5.1)**이 성립한다(권택연 외,1976).

$$\begin{cases} x = r\sin\theta\cos\phi \\ y = r\sin\theta\sin\phi \\ z = r\cos\theta \end{cases} \qquad \begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \tan\theta = \dfrac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \\ \tan\phi = y / x \end{cases} \qquad \textbf{(식 2.5.1)}$$

2.6 페레즈 천공 모델(Perez Sky Model)

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 Perez 의 모델(Perez et al. 1990,1993)이다.

Perez 모델은 태양 천정각, 천공의 청정도, 천공의 밝기 및 대기의 수증기량의 4가지 인자를 사용하여 천공의 휘도분포를 **(식 2.6.1)～(식 2.6.17)**의 단계를 거쳐 계산할 수 있는 것이다.

$$\varepsilon = [(I_d + I_{DN}) / I_d + 1.104Z^3] / [1 + 1.104Z^3] \quad \textbf{(식 2.6.1)}$$

$$\Delta = I_d \times m/I_{ON} \quad \textbf{(식 2.6.2)}$$

$$W = \exp(0.07 \times T_d - 0.075) \quad \textbf{(식 2.6.3)}$$

여기서,

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: 3 시간 동안의 지표면 노점 온도(℃)

대기권 밖의 법선면 일사(I_{ON})와 대기권 밖의 수평면 일사 (I_{Oh})는 각각 **(식 2.6.4)**와 **(식 2.6.5)**에 의해 계산한다.

$$I_{ON} = I_{sc}[1 + 0.33\cos(\frac{360n}{365})] \quad \textbf{(식 2.6.4)}$$

$$I_{Oh} = I_{sc}[1 + 0.33\cos(\frac{360n}{365})] \times \cos Z \quad \textbf{(식 2.6.5)}$$

여기서, I_{sc}: 태양 상수 (1350 W/m^2)

n: 1 월 1 일로부터의 통산일($1 \leq n \leq 365$)

천공 청정도는 **(식 2.6.6)**에 의해 계산한다.

$$k_T = \frac{I_T}{I_{Oh}} \quad \textbf{(식 2.6.6)}$$

여기서,

k_T: 시간별 청정도

I_{Oh}: 대기권 밖의 수평면 일사량(W/m^2)

그리고, 확산 일사량은 **(식 2.6.7)**에 의해 구한다.

$$\frac{I_d}{I_T} = 1.0 - 0.09k_T \, (k_T \leq 0.22) \quad \textbf{(식 2.6.7)}$$

$$= 0.9511 - 0.1604k_T + 4.3888k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 (0.22 < k_T \leq 0.8)$$

$$= 0.165 \; (0.8 \leq k_T)$$

또한, 수평면 직달 일사량과 연직면 직달 일사량은 각각 **(식 2.6.8)**과 **(식 2.6.9)**에 의해 구한다.

$$I_{DH} = I_T - I_d \quad \textbf{(식 2.6.8)}$$

$$I_{DN} = I_{DH} / \sin(a_t) \quad \textbf{(식 2.6.9)}$$

여기서, a_t: 태양 고도각 (rad)

천공의 밝기(Δ)를 계산하기 위하여, 광학적 대기의 두께(m)과 대기권 밖의 직달 일사(I_{ON})가 입력값으로 필요하다. 태양이 천공 천정에 있을 때의 복사선이 통과하는 대기의 두께와 임의의 위치에서 통과하는 대기 두께와의 비율인 광학적 대기의 두께는 **(식 2.6.10)**에 의해서 얻어진다.

$$m = \frac{1}{\cos Z} \qquad \textbf{(식 2.6.10)}$$

연직면 및 수평면 직달 조도(E_{dH})와 수직면 직달 조도(E_{dV})는 각각 **(식 2.6.11), (식 2.6.12), (식 2.6.13)**에 의해 구할 수 있다.

$$E_{dN} = MAX\{0, I_{DN}[a_i + b_iW + c_i\exp(5.73Z-5) + d_i\Delta]\} \qquad \textbf{(식 2.6.11)}$$

$$E_{dH} = E_{dN} \times \sin a_t \qquad \textbf{(식 2.6.12)}$$

$$E_{dV} = E_{dN} \times \cos a_t \qquad \textbf{(식 2.6.13)}$$

여기서,

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(**[표 2.6.1]** 참조)

[표 2.6.1] 직달일사의 발광효율 계수

청정도(ε)	a_I	b_I	c_i	d_I
1	57.20	-4.55	-2.98	117.12
2	98.99	-3.46	-1.21	12.38
3	109.83	-4.90	-1.71	-8.81
4	110.34	-5.84	-1.99	-4.56
5	106.36	-3.97	-1.75	-6.16
6	107.19	-1.25	-1.51	-26.73
7	105.75	0.77	-1.26	-34.44
8	101.18	1.58	-1.10	-8.29

수평면 확산 조도 (E_{kH})는 다음과 같이 **(식 2.6.14)**로 구할 수 있다.

$$E_{kH} = I_d[a_i + b_iW + c_i\exp(Z) + d_iLn(\Delta)] \quad \textbf{(식 2.6.14)}$$

여기서

E_{kH} : 수평면 확산 조도(lx)

a_i, b_i, c_i, d_i : 실험식에 의해 구해진 계수 (**[표 2.6.2]** 참조)

[표 2.6.2] 확산 일사의 발광효율 계수

청정도(ε)	a_I	b_i	c_i	d_i
1	97.24	-0.46	12.00	-8.91
2	107.22	1.15	0.59	-3.95
3	104.97	2.96	-5.53	-8.77
4	102.39	5.59	-13.95	-13.90
5	100.71	5.94	-22.75	-23.74
6	106.42	3.83	-36.15	-28.83
7	141.88	1.90	-53.24	-14.03
8	152.23	0.35	-45.27	-7.98

경사면 확산 조도(E_{kS})는 수평 확산 조도와 경사표면에 대한 천공 상태로부터 계산 될 수 있다. 이것은 **(식 2.6.15)**과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{kS} = E_{kH}[(1-F_1)(1+\cos S)/2 + F_1 \times a/b + F_2 \sin S] \quad \textbf{(식 2.6.15)}$$

여기서,

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

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

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

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

S = 경사진 평면의 기울기

θ = 경사진 평면에 들어오는 직사일광의 입사각

$f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{21}, f_{22}, f_{23}$은 천공 청정도(타입 1-8)에 따른 계수이다. (**[표 2.6.3]** 참조)

[표 2.6.3] 경사면 조도 계수

청정도(ε)	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
1	0.011	0.570	-0.081	-0.095	0.158	-0.018
2	0.429	0.363	-0.307	0.050	0.008	-0.065
3	0.809	-0.054	-0.442	0.181	-0.169	-0.092
4	1.014	-0.252	-0.531	0.275	-0.350	-0.096
5	1.282	-0.420	-0.689	0.380	-0.559	-0.114
6	1.426	-0.653	-0.779	0.425	-0.728	-0.097
7	1.485	-1.214	-0.784	0.411	-0.629	-0.082
8	1.170	-0.300	-0.615	0.518	-1.892	-0.055

천공 천정 휘도 함수는 **(식 2.6.16)**으로 나타낼 수 있다.

$$L_{vz} = I_d[a_i + c_i \cos Z + c_I{*}\exp(-3Z) + d_i(\Delta)] \qquad \textbf{(식 2.6.16)}$$

여기서

L_{vz} : 천정 휘도(W/m^2)

a_i, c_i, c_i*, d_i : 계수 (**[표 2.6.4]** 참조)

[표 2.6.4] 천정의 휘도 예측 계수

청정도(ε)	a_i	c_i	c_i*	d_i
1	40.86	26.77	-29.59	-45.75
2	26.58	14.73	58.46	-21.25
3	19.34	2.28	100.00	0.25
4	13.25	-1.39	124.79	15.66
5	14.47	-5.09	160.09	9.13
6	19.76	-3.88	154.61	-19.21
7	28.39	-9.67	151.58	-69.39
8	42.91	-19.62	130.80	-164.08

Perez 는 많은 천공데이터의 측정 실험에 의해 간단한 수학적 구조를 가지는 모델을 개발하였다. 이 모델은 천공 휘도 분포를 예측하기 위해서 시간별 또는 더 세밀한 시간 동안의 전체, 직달 일사 데이터를 사용할 수 있도록 만들어졌으며 CIE 표준 천공 형태를 일반화한 수식을 포함하고 있다. 그 일반식은 담천공에서 청천공까지의 휘도 분포에 대해 적절히 설명할 수 있는 다섯가지의 실험 계수(a, b, c, d, e)를 포함하고 있다.

예측점 *Lv* 의 천공 휘도와 임의의 기준점의 휘도와의 비율로 정의되는 상대 휘도 *lv* 는 **(식 2.6.17)**에 의해서 얻어진다.

$$lv = f(\xi, \gamma)$$
$$= [1 + a \exp(b / \cos \xi)][1 + c \exp(d\gamma) + e \cos^2\gamma] \qquad \textbf{(식 2.6.17)}$$

여기서,

lv : 상대 휘도

γ : 태양과 예측점 사이의 각(rad)

ξ : 예측점의 천정각(rad)

a, b, c, d, e : 상대 휘도 예측에 대한 실험 계수 (**[표 2.6.5]** 참조)

[표 2.6.5] 상대 휘도 예측 실험 계수

청정도	a_1	a_2	a_3	a_4	b_1	b_2	b_3	b_4
1.000 ~ 1.065	1.3523	-0.2576	-0.2690	-1.4366	-0.7670	0.0007	1.2734	-0.1233
1.065 ~ 1.230	-1.2219	-0.7730	1.4148	1.1016	-0.2054	0.0367	-3.9128	0.9156
1.230 ~ 1.500	-1.1000	-0.2515	0.8952	0.0156	0.2782	-0.1812	-4.5000	1.1766
1.500 ~ 1.950	-0.5484	-0.6654	-0.2672	0.7117	0.7234	-0.6219	-5.6812	2.6297
1.950 ~ 2.800	-0.6000	-0.3566	-2.5000	2.3250	0.2937	0.0496	-5.6812	1.8415
2.800 ~ 4.500	-1.0156	-0.3670	1.0078	1.4051	0.2857	-0.5328	-3.8500	3.3750
4.500 ~ 6.200	-1.0000	0.0211	0.5025	-0.5119	-0.3000	0.1922	0.7023	-1.6317
6.200 ~	-1.0500	0.0289	0.4260	0.3590	-0.3250	0.1156	0.7781	0.0025
	c_1	c_2	c_3	c_4	d_1	d_2	d_3	d_4
1.000 ~ 1.065	2.8000	0.6004	1.2375	1.0000	1.8734	0.6297	0.9738	0.2809
1.065 ~ 1.230	6.9750	0.1774	6.4477	-0.1239	-1.5798	-0.5081	-1.7812	0.1080
1.230 ~ 1.500	24.7219	-13.0812	-37.7000	34.8438	-5.0000	1.5218	3.9229	-2.6204
1.500 ~ 1.950	33.3389	-18.3000	-62.2500	52.0781	-3.5000	0.0016	1.1477	0.1062
1.950 ~ 2.800	21.0000	-4.7656	-21.5906	7.2492	-3.5000	-0.1554	1.4062	0.3988
2.800 ~ 4.500	14.0000	-0.9999	-7.1406	7.5469	-3.4000	-0.1078	-1.0750	1.5702
4.500 ~ 6.200	19.0000	-5.0000	1.2438	-1.9094	-4.0000	0.0250	0.3844	0.2656
6.200 ~	31.0625	-14.5000	-46.1148	55.3750	-7.2312	0.4050	13.3500	0.6234
	e_1	e_2	e_3	e_4				
1.000 ~ 1.065	0.0356	-0.1246	-0.5718	0.9938				
1.065 ~ 1.230	0.2624	0.0672	-0.2190	-0.4285				
1.230 ~ 1.500	-0.0156	0.1597	0.4199	-0.5562				
1.500 ~ 1.950	0.4659	-0.3296	-0.0876	-0.0329				
1.950 ~ 2.800	0.0032	0.0766	-0.0656	-0.1294				
2.800 ~ 4.500	-0.0672	0.4016	0.3017	-0.4844				
4.500 ~ 6.200	1.0468	-0.3788	-2.4517	1.4656				
6.200 ~	1.5000	-0.6426	1.8564	0.5636				

다섯가지의 계수는 많은 실험 데이터를 가지고 위의 식을 비선형 최소 자승법에 의하여 유추한 태양 천정각, 천공 청정도와 밝기, 이 세가지 일사 상태의 함수이다. 각각의 계수는 다음과 같이 **(식 2.6.18)** ~ **(식 2.6.20)**의 형식을 따른다.

a, b, c, d, e 를 x 라고 할 때

$$x = x_1 + x_2Z + \Delta(x_3 + x_4Z)$$ **(식 2.6.18)**

천공 청정도가 1 일 경우에는

$$c = \exp[\Delta (c_1 + c_2Z)^{C_3}]^{-1}$$ **(식 2.6.19)**

$$d = -\exp[\Delta (d_1 + d_2Z)] + d_3 + \Delta d_4$$ **(식 2.6.20)**

결국, 예측하고자 하는 지점의 휘도 L_v는 L_{vz}을 일반화하여 l_v로부터 얻을 수 있다. 이것은 **(식 2.6.21)**과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_v = L_{vz} \times f(\zeta, \gamma) / f(0, Z)$$ **(식 2.6.21)**

여기서,

L_v : 천공 휘도(cd/m^2)

더 일반적으로, 천공 휘도(Lv)는 확산 조도의 천공 모델을 일반화하여 **(식 2.6.22)**와 같이 얻을 수 있다.

$$L_v = l_v \times E_{kH} / \left(\int_{2\pi sr} [l_v(\zeta, \gamma) \cos\zeta] d\omega \right)$$ **(식 2.6.22)**