# 제 2 장 기본 이론의 검토

## 2.1 표준기상년(Typical Meteorological Year)

### 2.1.1 표준기상년의 정의

표준기상년이란 대상 지역의 장기간 기상 자료를 토대로 하여 범위로 정한 조사 대상년들 중 해당 지역의 기상 상태를 대표할 수 있는 달을 선정 □ 추출해서 1년의 12 개월을 구성한 것이다(Hall et al. 1979, Feuerman et al. 1985).

### 2.1.2 표준기상년의 특성

표준기상년은 일반적으로 다음과 같은 특성을 지니고 있다(Pissimanis et al. 1988).

- 표준기상년은 주요 기상 요소들(온도, 일사량, 풍속)의 분포가 장기적인 분포와 가까운 분포를 보여야 한다.
- 표준기상년의 각각의 기상 요소값들의 일별 추이는 그 지역에서 흔히 관찰할 수 있는 것과 유사해야 한다.
- 표준기상년의 기상 요소들간의 관계는 실제 자연 상태에서 측정될 수 있는 그러한 관계를 가져야한다.

### 2.1.3 표준기상년에 필요한 기상 요소

표준기상년 작성에 필요한 기상 요소는 다음과 같다.

- 건구온도
- 노점온도
- 풍속
- 수평면 전천 일사량

위에 열거한 네 가지 기상 요소들은 표준기상년을 작성할 때 일종의 초기 변수가 된다. 이유는 위의 네 가지 기상 요소가 그대로 이용되는 것이 아니라 건구온도, 노점온도, 풍속은 각각 일별 최대 □ 최소 □ 평균치가 일사량은 일별 총합치가 이용되기 때문이다. 그래서 네 개의 기상 요소에 대한 열 개의 계산치가 표준년 기상 데이터를 구하는 데 이용된다. 즉, 네 가지 기상 요소에 대해 열 개의 계산치가 나오고 이들이 표준기상년을 작성하는 데 이용되는 일종의 최종 변수가 된다.

### 2.1.4 표준기상년 작성 방법

표준기상년을 작성하는 방법과 순서는 크게 다섯 단계로 나눌 수 있다.

(1) CDF(Cumulative Distribution Function)

CDF 란 한 기상 요소의 특정치보다 작거나 같은 수치의 비율을 의미하는 누적 분포 함수로써 0 부터 1 까지의 범위를 가지고 단순 증가 추세를 보이는 함수이다.

CDF 는 데이터를 우선 증가 순서대로 분류하고 다음 식을 이용하여 얻어진다.

$$\mathbf{CDF}\,x(i) = \begin{cases} 0 & \{x < x(1)\} \\ (k - 0.5)/n & \{x(k) \le x < x(k+1)\} \\ 1 & \{x \ge x(n)\} \end{cases} \qquad \textbf{(식 2.1.1)}$$

여기서,

***x(k)*** : 기상 요소 *x* 에 대한 크기 순서

( 최소에서 최대까지 )

**n** : 기상 요소 *x* 에 대한 측정치의 개수

예를 들면, 6 월의 일일 평균 건구온도의 장기간에 대한 CDF 를 계산한다고 했을 때 조사 대상년 범위에 속하는 대상 년수(본 연구에서는 20 년)의 모든 건구온도 평균치(30×20 = 60)를 우선적으로 증가 순서대로 분류하고 건구온도 평균치의 각 값에 대한 CDF 를 계산한다. 반면, 월별 CDF 를 계산하기 위해서는 30 개의 값을 우선적으로 증가 순서대로 분류한 다음 계산한다.

이런 방법으로 장기간 CDF 와 월별 CDF 두 가지가 특정 값 각각에 대해 주어지게 된다.

(2) FS 값(Finkelstein-Schafer Statistics)

CDF 가 계산된 이후 월별 CDF 와 장기간 CDF 간의 차이의 평균이 표준기상년 작성시 초기 변수인 건구온도, 노점온도, 풍속, 일사량의 4 가지 기상 요소에서 최종 변수가 되는 건구온도 최대치, 건구온도 최소치, 건구온도 평균치, 노점온도 최대치, 노점온도 최소치, 노점온도 평균치, 풍속 최대치, 풍속 최소치, 풍속 평균치, 일사량 총합치의 10 가지 값들에 대해 계산되어 장기간 CDF 에 대한 월별 CDF 의 근접도가 결정된다(Finkelstein and Schafer, 1971).

이것을 식으로 표현하면 **(식 2.1.2)**와 같다.

$$\mathbf{FS} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_{\mathrm{i}} \qquad \textbf{(식 2.1.2)}$$

여기서,

$\boldsymbol{\delta}_{\mathbf{i}}$ : 기상 요소 $x$ 에서 장기간 CDF 와 월별 CDF 간의 절대차 ( i = 1, 2, 3,…, n )

**n** : 해당 월의 일일 측정 수치의 개수

(3) FS 값의 가중치 합(Weighted Sum of FS Statistics)

기상 요소들이 건물의 에너지 성능에 영향을 미치는 영향은 각각 다르다. 즉, 에너지 시뮬레이션에 있어서 기상 요소들간에 시뮬레이션 결과에 미치는 영향도 달라질 수 밖에 없다. 그래서, 기상 요소들간에 중요도의 차이가 나게 되는데, 예로써 일사량이 다른 기상 요소들보다 에너지 성능에 미치는 영향이 제일 크고 그렇기 때문에 가장 중요하다. 따라서, 각 기상 요소들의 FS 값에 중요도에 따라 서로 다른 가중치를 부여해야 한다.

표준기상년에서는 이를 FS 값의 가중치 합이라 하며 **(식 2.1.3)**에 의해 계산된다.

$$\mathbf{WS}i = \sum_{i=1}^{n} WiFSi \qquad \textbf{(식 2.1.3)}$$

여기서,

***Wi*** : 기상 요소별 가중치 값

***FSi*** : 기상 요소별 FS 값

**i** : 기상 요소의 개수

표준기상년 작성시 기상 요소별 최종 변수가 되는 계산치에 대한 가중치 값은 **[표 2.1.1]**과 같다.

**[표 2.1.1] 기상 요소별 가중치**

| 건구온도 | | | 노점온도 | | | 풍 속 | | | 일사량 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 최대 | 최소 | 평균 | 최대 | 최소 | 평균 | 최대 | 최소 | 평균 | 합 |
| 1/24 | 1/24 | 2/24 | 1/24 | 1/24 | 2/24 | 2/24 | 0 | 2/24 | 12/24 |

( 가중치 값의 합은 1 )

(4) 표준기상년 작성을 위한 해당 월별 후보년 선정

표준기상년을 구성하는 1 년의 1 월부터 12 월까지의 각 월들은 위의 과정을 거친 후에 바로 해당 월의 년이 선정되는 것이 아니다. 보다 선정의 정확성을 기하기 위하여 해당 월별 후보년이 선정된다(Song, 1989).

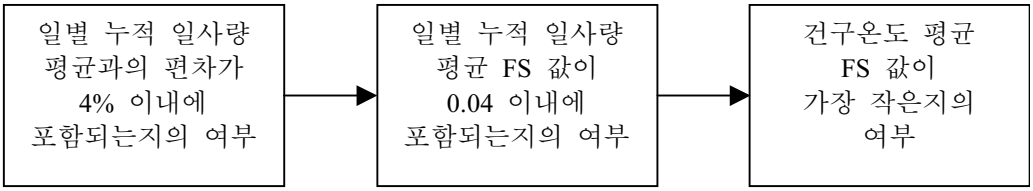
후보년은 각 월당 5 개년이며 선정되는 기준은 FS 값의 가중치 합이 가장 작은 순이다.

(5) 월/년 조합의 최종 표준기상년

해당 월별로 후보년이 선정된 이후, 표준기상년의 최종 작성이 이루어지게 된다. 표준기상년의 최종 작성은 해당 월별로 건구온도의 평균과 일별 누적 일사량의 평균에 대해서 후보년 각각의 평균값과 조사 대상년 수 전체에 대한 장기간 평균값의 차이 및 후보년 각각의 FS 값의 대소 관계를 비교하여 선정된 월들에 의해 완성된다.

표준기상년의 최종 작성은 작성자의 주관적인 방법에 의해 이루어지기는 하지만 채택한 방법에서 나온 결과의 편차의 작은 정도로 판별이 된다면 큰 무리는 없는 것으로 사료된다.

최종 월/년 조합 표준기상년 작성을 위해서 후보년들 중 해당 월 선정 기준 및 순서는 **[그림 2.1.1]**과 같다.




**[그림 2.1.1] 후보년들 중 해당 월 선정 기준 및 순서**

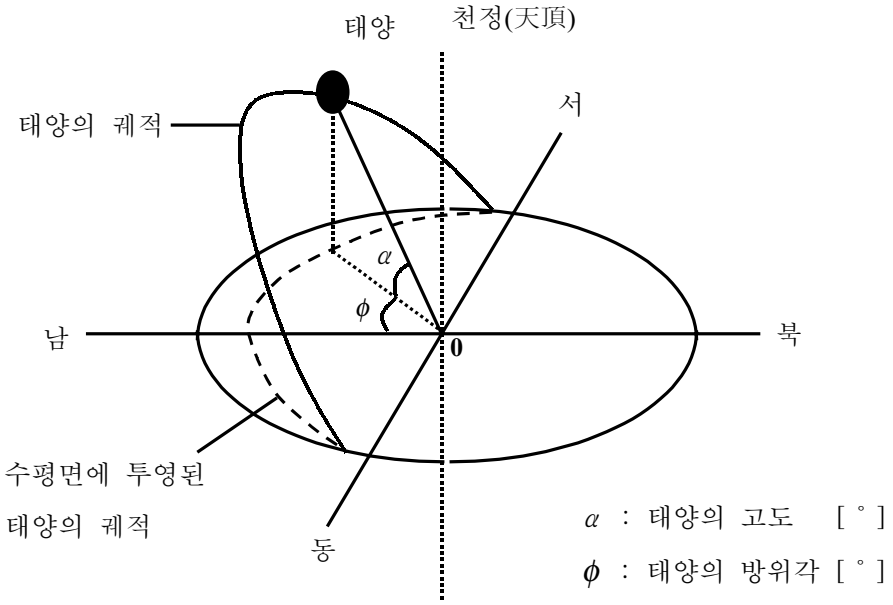
위의 세 가지 기준을 근거로 해서 5 개의 후보년 중에 만약 첫 번째 기준을 만족시키는 것이 하나밖에 없다면 그것이 해당 월의 월/년 조합 표준기상년으로 선택이 되고 두 개 이상의 복수가 첫 번째 기준을 만족시킨다면 두 번째 기준을 적용시키게 된다. 여기서도 복수가 선정되면 세 번째 마지막 기준을 적용시키는 것이다. 이렇게 하여 월/년 조합으로 구성된 최종 표준기상년이 작성된다.

## 2.2 외부 조도 및 천공 휘도 분포

자연채광 계획의 적절한 평가를 위해서 설계자는 천공 조건과 외부 조도에 관한 적절한 자료가 필요하고 주어진 지역 조건, 건물 방위 또는 연중 기간에 따른 외부 조도에 관한 데이터가 필요하다(Szokolay, 1980).

### 2.2.1 태양의 고도와 방위각

외부 조도 및 천공 휘도 분포를 계산하기 위해서는 우선 태양의 고도와 방위각을 계산해야 한다. 태양의 고도와 방위각은 계산 대상 장소의 위도와 경도, 계산 대상 날짜와 시간으로부터 구할 수 있다. **[그림 2.2.1]**은 태양의 고도각과 방위각의 개념을 나타낸 것으로서 태양의 고도($\alpha$)는 태양과 수평면이 이루는 각도를 말하며 방위각($\phi$)은 태양이 수평면에 투영된 위치가 정남쪽과 이루는 수평각을 말한다.




**[그림 2.2.1] 태양의 위치**

**[그림 2.2.1]**의 태양 고도($\alpha$)와 방위각($\phi$)은 각각 **(식 2.2.1)**과 **(식 2.2.2)**에 의해 구할 수 있다.

$$h = \sin^{-1}(\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega) \qquad \textbf{(식 2.2.1)}$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{\sin h \sin\varphi - \sin\delta}{\cos h \cos\varphi}\right) \qquad \textbf{(식 2.2.2)}$$

여기서,

$\varphi$ : 위도 [°]

$\delta$ : 태양 적위 [°]

$\omega$ : 시각 [°] [1 시간당 15° 의 비율로 시간을 각도로 환산한 것]

계산 대상일의 태양 적위를 구하기 위해서는 1 월 1 일부터의 통산일과 태양 횡경값을 구해서 계산할 수 있다. 통산일을 구하는 방법은 통산일을 계산하는 달의 전달 말일까지의 통산일에 그 달의 예측 날짜를 더함으로써 구할 수 있다. **(식 2.2.3)**은 M 월 D 일의 통산일 n 을 구하는 식을 보여주는 것이다.

$$n = int[\{153(M-1)+Z\}/5+D] \qquad \textbf{(식 2.2.3)}$$

여기서,

**M**<3 일 때 **Z**=2,

**M**≥3 일 때 **Z**=-9 이며

**Int[x]**는 **x** 의 소수 부분을 제외한 정수 부분을 나타낸다.

횡경값(**B**)은 **(식 2.2.4)**를 가지고 얻어진 통산일(**n**)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$B = 360\frac{n-81}{365}[°] \qquad \textbf{(식 2.2.4)}$$

태양 적위($\delta$)는 **(식 2.2.5)**에 의해 근사값으로 계산할 수 있다.

$$\delta = \sin^{-1}(\sin 23^\circ 27' \times \sin B) = \sin^{-1}(0.397949 \times \sin B) \qquad \text{(식 2.2.5)}$$

시각($\omega$)은 **(식 2.2.6)**에 의해서 계산할 수 있다.

$$\omega = (t_{AS} - 12) \times 15 = \{t + (E + \frac{L - Ls}{15} - 12)\} \times 15 \qquad \text{(식 2.2.6)}$$

여기서,

$t_{AS}$ : 진태양시 [시]

**t** : 표준시 [시]

**E** : 균시차 [분]

**L** : 경도 [°]

**Ls** : 표준 자오선의 경도[우리나라의 경우, 135° E]

균시차(E)는 평균 태양시와 진태양시의 차이를 의미하며 **(식 2.2.7)**과 같은 근사식에 의해 구할 수 있다.

$$E = \frac{1}{60}(9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B) = 0.1645\sin 2B - 0.1255\cos B - 0.025\sin B \qquad \text{(식 2.2.7)}$$

### 2.2.2 천공 조건과 외부 조도

천공은 기본적으로 청천공(Clear Sky), 부분 담천공(Partly Cloudy Sky), 담천공(Overcast Sky)의 3 가지로 구분되는데 현재까지 전 세계의 수 많은 연구자들이 이 세 가지 주요 천공 상태를 결정하기 위하여 운량의 범위를 서로 다르게 선택하고 있으며 서로 다른 척도, 즉 10 척도와 8 척도(구름으로 덮혀있는 천공의 면적 비율), 뿐만 아니라 서로 다른 분류 방법을 사용하고 있다. 각 연구자들의 분류 방법을 정리하면 다음과 같다.

Nakamura 와 Oki(1979)는 10 척도를 사용하여 청천공으로 2.5/10 이하인 운량을, 운량 7.5/10 이상을 담천공으로 그리고 이들 사이를 부분 담천공으로 정의하였다. Ruck(1985)은 8 척도를 사용하고 있으며 2/8 이하의 운량을 청천공으로, 운량 2~6/8

범위를 부분 담천공으로, 운량 7 이상을 담천공으로 구분하고 있다. 미국 국립해양대기청(NOAA)도 운량에 의해 천공 상태를 분류하는데, 운량 0~3/10 을 청천공으로, 운량 4~7/10 을 부분 담천공으로, 운량 8~10/10 을 담천공으로 제안하고 있다.

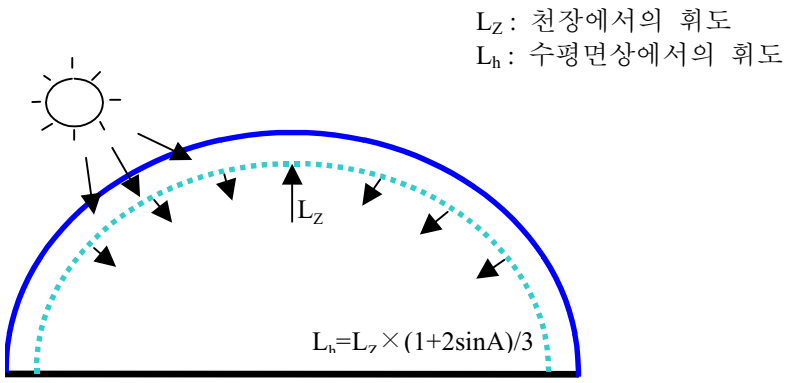
Pierpoint(1983)는 천공의 시각적 관찰에 의한 다른 간단한 방법을 소개했다. 그는 우세한 천공의 색에 따라 천공의 색이 주로 청색일 때 청천공으로, 주로 흰 색일 때 부분 담천공으로, 주로 회색일 때 담천공으로 분류할 것을 제안하고 있다.

미국의 NIST(National Institute of Science and Technology)에서는 특정 위치에서 특정 시간에 천공이 청천공, 부분 담천공, 담천공인가를 결정하기 위해서 sky ratio method 를 사용하고 있다(1984). 이 방법은 운량비(CR)를 이용한 것이다. 운량비는 수평면 전 일사에 대한 수평면 천공 일사의 비로서 태양 일사의 자료만으로 결정된다. 천공의 분류는 CR < 0.3 이면 청천공, 0.3 < CR < 0.8 이면 부분 담천공, CR > 0.8 이면 담천공으로 제시하고 있다. 부가하여 기존의 기상 자료로부터 쉽게 얻을 수 있는 CR 은 흐림의 정도와 대기 투명의 정도를 나타내는 데 사용될 수 있다. 이 CR 은 다른 연구자들(Perraadeau, 1986)에 의해서도 흐림의 정도를 특정화하기 위해서 사용되었다.

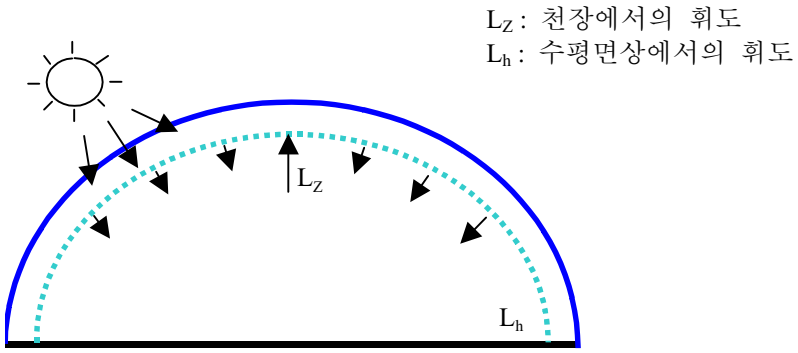
대기 감소의 지표로서 Kittler 등(1987)은 Linke 의 혼탁율을, 미국의 LBL(로렌스 버클리 연구실)에서는 조도의 혼탁율을 이용하였고 이들의 혼탁율은 청명의 정도를 규명하는 데 상당히 효율적인 것으로 제안되고 있다. 그러나 이 혼탁율들은 태양 법선면 조도 및 일사가 측정되어야 하고 다른 기상 항목들의 자료가 이용 가능하여야 하므로 이의 응용이 매우 제한되어 있다.

목측에 의해서 나타내는 가시 천공율은 장기간동안 전 세계의 기상대에서 인간의 눈에 의해서 사용된 천공 상태 분류의 표준이다. 이러한 목측법은 천공의 운량을 10 등분하여 구름이 전혀 없을 때를 0, 구름이 완전히 덮혀 있을 때를 10 으로 측정하여 운량이 0~2 일 때를 청천공, 운량이 3~7 일 때를 부분 담천공, 운량이 8~10 일 때를 담천공으로 분류한다.

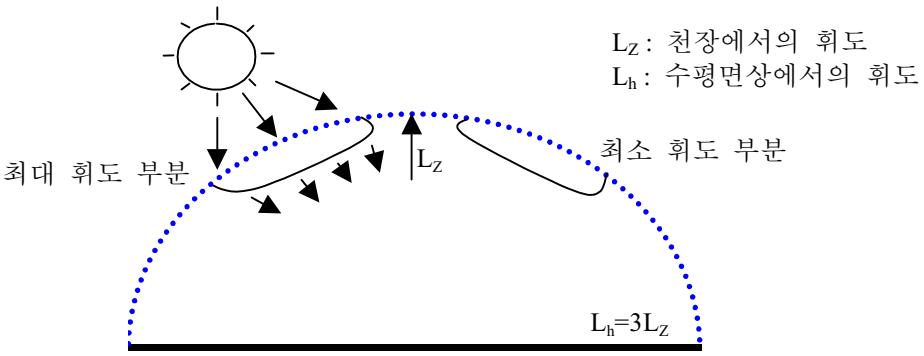
외부 조도는 직사일광(Beam Sunlight Illuminance)에 의한 조도, 확산천공광(Diffuse Sky Illuminance)에 의한 조도, 이 두 가지를 더한 주광조도(Daylight Illuminance)로 분류된다(이상우 외, 1997).




**[그림 2.2.2] 표준담천공**




**[그림 2.2.3] 균일담천공**




**[그림 2.2.4] 청천공**

### 2.2.3 페레즈 천공 모델(Perez Sky Model)

자연채광에 의한 외부 조도 및 천공 휘도 분포를 예측하기 위해서는 직사일광과 확산천공광에 의한 외부 조도 및 천공 휘도 분포를 알아야 하는 것이 무엇보다 중요하다. 천공광의 경우, 실제 천공 상태의 휘도 분포를 정확하게 예측하기란 거의 불가능하다. 하지만 많은 연구에 의해서 실제 천공 상태와 비슷한 천공 모델들이 개발되었다.

CIE 는 Kittler 의 청천공 모델(Kittler, 1965)과 Pierpoint 의 부분 담천공 모델(Pierpoint, 1963), Moon 과 Spencer 의 담천공 모델(Moon & Spencer, 1942)을 표준 천공 모델로 채택하였다. CIE 표준 담천공 모델은 태양이 완전히 구름에 가려 안 보이는 것으로 가정한다. 하지만 여러 지역에서의 실제 천공 상태는 상당히 다른 것으로 자주 나타나므로 많은 연구자들에 의해 연구 결과가 발표되어 왔다.

현재까지 개발되어 있는 천공 휘도 분포 모델 중 다양한 상태의 천공 조건에 대해 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 모델은 Perez 의 천공 모델(Perez et al. 1990,1993)이다.

Perez 는 실제 천공 상태에서의 일사량 데이터로부터 천공의 분포를 모델링하기 위한 기존 방법(Brunger's model, Harrison's model, Kittler's Model, Matsuura's model, Perraudeau's model, ASRC-CIE model 등)들이 가지고 있는 몇 가지 기본적 단점과 장점들을 비교하였다(Perez et al, 1993).

다음 **[표 2.2.1]~ [표 2.2.4]**는 실제 천공과 Perez 모델, 기타 다른 천공 모델들의 평균 오차(MBE), 평균 제곱근 오차(RMSE)를 비교한 것이다.

**[표 2.2.1] 전체 천공 상태에서의 천공 모델 비교**

| | 전천공 | | 천정 구역 | | 태양의 반대편 천공 | | 태양의 동서쪽 구역 | | 태양의 북쪽 구역 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 평균 휘도 | 4748 | | 4294 | | 8377 | | 4003 | | 3446 | |
| | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE |
| ASRC-CIE | -75 | 2113 | 87 | 1920 | -10 | 3776 | -42 | 1396 | -361 | 1250 |
| Brunger | 227 | 2312 | 207 | 2092 | -489 | 4157 | -268 | 1511 | -333 | 1344 |
| Perraudeau | 26 | 2553 | -250 | 2238 | 36 | 4097 | 111 | 1913 | 112 | 2147 |
| Harrison | 197 | 2363 | 283 | 2045 | -1063 | 4324 | -195 | 1522 | 109 | 1356 |
| Matsuura | 161 | 2443 | 267 | 2255 | -1058 | 4451 | -271 | 489 | -46 | 1426 |
| Kittler | 229 | 2520 | 461 | 2350 | -1373 | 4536 | -165 | 1552 | -6 | 1552 |
| Mean sky | 0 | 1880 | 0 | 1768 | 1 | 3319 | 1 | 1264 | 0 | 1079 |
| Perez Model | -12 | 1966 | 23 | 1846 | -24 | 3469 | -41 | 1320 | 22 | 1144 |

**[표 2.2.2] 청천공 상태에서의 천공 모델 비교**

| | 전천공 | | 천정 구역 | | 태양의 반대편 천공 | | 태양의 동서쪽 구역 | | 태양의 북쪽 구역 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 평균 휘도 | 3808 | | 3040 | | 7155 | | 3199 | | 2757 | |
| | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE |
| ASRC-CIE | -101 | 1051 | -23 | 1135 | 100 | 1736 | -125 | 681 | -310 | 713 |
| Brunger | -275 | 1350 | 96 | 1072 | -394 | 2442 | -310 | 887 | -453 | 910 |
| Perraudeau | -340 | 1434 | 121 | 1032 | 393 | 2175 | -579 | 1182 | -965 | 1390 |
| Harrison | -300 | 1334 | 261 | 1014 | -664 | 2374 | -441 | 1013 | -224 | 726 |
| Matsuura | -102 | 1051 | -22 | 1135 | 95 | 1734 | -125 | 681 | -312 | 715 |
| Kittler | -252 | 1163 | 450 | 1196 | -394 | 1833 | -383 | 849 | -534 | 860 |
| Mean sky | 0 | 773 | 0 | 761 | 0 | 1307 | 0 | 543 | 0 | 472 |
| Perez Model | -10 | 905 | -18 | 897 | 5 | 1558 | -103 | 587 | 177 | 585 |

**[표 2.2.3] 부분 담천공 상태에서의 천공 모델 비교**

| | 전천공 | | 천정 구역 | | 태양의 반대편 천공 | | 태양의 동서쪽 구역 | | 태양의 북쪽 구역 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 평균 휘도 | 12067 | | 14238 | | 18393 | | 10244 | | 7954 | |
| | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE |
| ASRC-CIE | 36 | 3952 | 193 | 4038 | -999 | 7018 | 573 | 2474 | -282 | 1981 |
| Brunger | -26 | 4423 | 534 | 5009 | 582 | 7676 | -553 | 2605 | -43 | 2172 |
| Perraudeau | 161 | 6144 | -1665 | 5872 | -3412 | 9120 | 2736 | 4631 | 4829 | 5743 |
| Harrison | 57 | 4382 | 401 | 4404 | -3195 | 7772 | 519 | 2607 | 1722 | 2666 |
| Matsuura | -431 | 5877 | 1242 | 6021 | -7319 | 10660 | 426 | 3077 | 2420 | 3558 |
| Kittler | -365 | 5981 | 964 | 6085 | -7379 | 10765 | 591 | 3176 | 2736 | 3829 |
| Mean sky | 0 | 3721 | 0 | 3960 | 2 | 6584 | 0 | 2212 | 0 | 1929 |
| Perez Model | -38 | 3790 | 340 | 4027 | -501 | 6662 | -85 | 2304 | 110 | 1989 |

**[표 2.2.4] 담천공 상태에서의 천공 모델 비교**

| | 전천공 | | 천정 구역 | | 태양의 반대편 천공 | | 태양의 동서쪽 구역 | | 태양의 북쪽 구역 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 평균 휘도 | 1114 | | 1313 | | 1109 | | 1055 | | 1043 | |
| | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE | MBE | RMSE |
| ASRC-CIE | -59 | 554 | 108 | 402 | -146 | 752 | -88 | 523 | -88 | 533 |
| Brunger | -24 | 527 | 42 | 377 | -87 | 717 | -28 | 496 | -25 | 507 |
| Perraudeau | 95 | 586 | -180 | 438 | 243 | 773 | 139 | 555 | 148 | 574 |
| Harrison | 15 | 596 | -45 | 457 | 356 | 888 | -40 | 513 | -122 | 545 |
| Matsuura | -59 | 554 | 108 | 402 | -146 | 752 | -88 | 523 | -88 | 533 |
| Kittler | -59 | 555 | 109 | 403 | -147 | 752 | -88 | 523 | -89 | 533 |
| Mean sky | 0 | 497 | 0 | 357 | 1 | 670 | 0 | 469 | 0 | 484 |
| Perez Model | -1 | 521 | -18 | 372 | -41 | 706 | 23.5 | 493 | 2 | 504 |

CIE 표준 천공은 청천공(Clear Sky), 부분 담천공(Partly Cloudy Sky), 담천공(Overcast Sky) 세 가지에 대한 것만을 포함하고 있기 때문에 좀 더 정확하고 다양한 상태에 대한 것을 고려하기 위해 Perez는 담천공에서 청천공에 이르는 모든 천공 휘도 분포의 변화를 설명하기 위한 모델을 만들었다.

Perez 천공 모델은 태양 천정각, 천공의 청정도, 천공의 밝기 및 대기의 수증기량의 4가지 인자를 사용하여 천공의 휘도 분포를 **(식 2.2.8)**～**(식 2.2.24)**의 단계를 거쳐 계산할 수 있는 것이다.

$$\varepsilon = [(I_d + I_{DN}) / I_d + 1.104Z^3] / [1 + 1.104Z^3] \quad \textbf{(식 2.2.8)}$$

$$\Delta = I_d \times m/I_{ON} \quad \textbf{(식 2.2.9)}$$

$$W = \exp(0.07 \times T_d - 0.075) \quad \textbf{(식 2.2.10)}$$

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($W/m^2$)

$T_d$: 3시간 동안의 지표면 노점 온도(℃)

대기권 밖의 법선면 일사($I_{ON}$)와 대기권 밖의 수평면 일사 ($I_{Oh}$)는 각각 **(식 2.2.11)**과 **(식 2.2.12)**에 의해 계산한다.

$$I_{ON} = I_{sc}[1 + 0.33\cos(\frac{360n}{365})] \quad \textbf{(식 2.2.11)}$$

$$I_{Oh} = I_{sc}[1 + 0.33\cos(\frac{360n}{365})] \times \cos Z$$ **(식 2.2.12)**

여기서, $I_{sc}$: 태양 상수 (1350 W/m$^2$)

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

천공 청정도는 **(식 2.2.13)**에 의해 계산한다.

$$k_T = \frac{I_T}{I_{Oh}}$$ **(식 2.2.13)**

여기서,

$k_T$: 시간별 청정도

$I_{Oh}$: 대기권 밖의 수평면 일사량(W/m$^2$)

그리고, 확산 일사량은 **(식 2.2.14)**에 의해 구한다.

$$\frac{I_d}{I_T} = 1.0 - 0.09k_T \, (k_T \leq 0.22)$$ **(식 2.2.14)**

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

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

또한, 수평면 직달 일사량과 연직면 직달 일사량은 각각 **(식 2.2.15)**와 **(식 2.2.16)**에 의해 구한다.

$$I_{DH} = I_T - I_d$$ **(식 2.2.15)**

$$I_{DN} = I_{DH} / \sin(a_t)$$ **(식 2.2.16)**

여기서, $a_t$: 태양 고도각 (rad)

천공의 밝기(Δ)를 계산하기 위하여, 광학적 대기의 두께(m)와 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 2.2.17)**에 의해서 얻어진다.

$$m = \frac{1}{\cos Z} \qquad \textbf{(식 2.2.17)}$$

연직면 및 수평면 직달 조도($E_{dH}$)와 수직면 직달 조도($E_{dV}$)는 각각 **(식 2.2.18), (식 2.2.19), (식 2.2.20)**에 의해 구할 수 있다.

$$E_{dN} = MAX\{0, I_{DN}[a_i + b_i W + c_i \exp(5.73Z-5) + d_i \Delta]\} \qquad \textbf{(식 2.2.18)}$$

$$E_{dH} = E_{dN} \times \sin a_t \qquad \textbf{(식 2.2.19)}$$

$$E_{dV} = E_{dN} \times \cos a_t \qquad \textbf{(식 2.2.20)}$$

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 2.2.5]** 참조)

**[표 2.2.5] 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 2.2.21)**로 구할 수 있다.

$$E_{kH} = I_d[a_i + b_iW + c_i\exp(Z) + d_iLn(\Delta)] \qquad \textbf{(식 2.2.21)}$$

여기서

$E_{kH}$ : 수평면 확산 조도(lx)

$a_i$, $b_i$, $c_i$, $d_i$ : 실험식에 의해 구해진 계수 (**[표 2.2.6]** 참조)

**[표 2.2.6] 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 경사 표면에 대한 천공 상태로부터 계산될 수 있다. 이것은 **(식 2.2.22)**와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{kS} = E_{kH}[(1-F_1)(1+\cos S)/2 + F_1 \times a/b + F_2 \sin S] \qquad \textbf{(식 2.2.22)}$$

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

$\theta$ = 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 2.2.7]** 참조)

**[표 2.2.7] 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 2.2.23)**으로 나타낼 수 있다.

$$L_{vz} = I_d[a_i + c_i \cos Z + c_I{*}\exp(-3Z) + d_i(\Delta)]$$ **(식 2.2.23)**

여기서,

$L_{vz}$ : 천정 휘도($W/m^2$)

$a_i$, $c_i$, $c_i$*, $d_i$ : 계수 (**[표 2.2.8]** 참조)

**[표 2.2.8] 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 천공 데이터의 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 다섯 가지의 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 2.2.24)**에 의해서 얻어진다.

$$lv = f(\xi, \gamma)$$
$$= [1 + a \exp(b / \cos \xi)][1 + c \exp(d\gamma) + e \cos^2\gamma] \qquad \textbf{(식 2.2.24)}$$

여기서,

$lv$ : 상대 휘도

$\gamma$ : 태양과 예측점 사이의 각(rad)

$\xi$ : 예측점의 천정각(rad)

a, b, c, d, e : 상대 휘도 예측에 대한 실험 계수 (**[표 2.2.9]** 참조)

**[표 2.2.9] 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 | | | | |

다섯 가지의 계수는 많은 실험 데이터를 가지고 위의 식을 비선형 최소 자승법 (Non-linear Least Square's Method)에 의하여 유추한 태양 천정각, 천공 청정도와 밝기, 이 세 가지 일사 상태의 함수이다. 각각의 계수는 다음과 같이 **(식 2.2.25)** ~ **(식 2.2.27)**의 형식을 따른다.

a, b, c, d, e 를 x 라고 할 때

$$x = x_1 + x_2Z + \Delta(x_3 + x_4Z)$$ **(식 2.2.25)**

천공 청정도가 1 일 경우에는

$$c = \exp[\Delta (c_1 + c_2Z)^{C_3}]^{-1}$$ **(식 2.2.26)**

$$d = -\exp[\Delta (d_1 + d_2Z)] + d_3 + \Delta d_4$$ **(식 2.2.27)**

결국, 예측하고자 하는 지점의 휘도 $L_v$는 $L_{vz}$를 일반화하여 $l_v$로부터 얻을 수 있다. 이것은 **(식 2.2.28)**과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_v = L_{vz} \times f(\zeta, \gamma) / f(0, Z)$$ **(식 2.2.28)**

여기서,

$L_v$ : 천공 휘도(cd/m$^2$)

더 일반적으로, 천공 휘도($Lv$)는 확산 조도의 천공 모델을 일반화하여 **(식 2.2.29)**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 2.2.29)**