

제 2 장 기본이론의 검토

2.1 자연채광 시스템

자연광을 실내로 유입하기 위한 일반적인 방법에는 측창이나 천창의 개구부를 통한 주광의 유입방법이 있다. 하지만 도심부에 건설되는 사무소 건물, 호텔 및 고층 아파트 등으로 인한 주변 환경 때문에 자연채광이나 통풍 면에서 여러가지 제약으로 인하여 건축적인 채광 수법으로는 실내에 자연광을 유입할 수 없는 곳에 여러가지 설비 시스템을 사용함으로써 필요한 자연채광을 실시하는 시스템을 설비형 자연채광 방식이라고 한다 (이상우 외 1995).

선진 외국의 경우 오랜전부터 자연광을 실내 조명에 이용하기 위해 집광장치를 통해 주광의 단위면적당 광속 밀도를 높인 다음 반사거울을 사용하여 빛을 필요한 곳으로 유도하는 방법을 연구해 오고 있다. 1800년대 후반, 미국과 소련의 과학자들은 건물의 측창을 통해 주광을 실내로 받아들이기 어려운 경우 집광장치와 방향 조절장치의 사용에 관심을 갖기 시작했다. 이렇게 시작한 주광을 모으며 방향을 조절하는 기술은 단순히 광선반에 의해 빛을 조절하는 것에서부터 광학 기술, 즉 광덕트 또는 광섬유, 광학 렌즈 등을 이용하여 빛을 건물의 깊숙한 곳 또는 지하공간으로 이동시키는 기술까지 발전하게 되었다 (Mirkovich 1993).

또한, 현대 건축물에서 아트리움은 여러가지 공간적기능을 가지고 건물 내부에 있는 거주자들에게 외부 자연 환경을 느끼게 하여 보다 쾌적한 실내 공간을 만들어준다. 외부 환경과 실내 환경의 완충 지역이 되어 에너지 절약 공간이 될 수 있다. 이미 오래전부터 아트리움을 많이 건설하여 왔으며, 아트리움의 환경을 예측 및 조절할 수 있는 기법들에 대해 많은 연구를 해왔다 (Song 1993; Song and Boyer 1994; Boyer and Song 1995).

다음은 자연채광 방식의 종류와 특성을 보여주고 있다.

2.1.1 천창을 통한 자연광 도입

천창을 통한 자연광 도입은 비교적 적은 설치비용으로 날이 맑을 경우 어두운 공간에 가장 효과적인 조명을 제공할 수 있지만 지붕 바로 아래 공간에서만 효과적일 수 있다. 천창을 통한 자연광 도입은 광정, 고창, 모니터형과 톱날형 천창(Monitor Roof, Sawtooth Roof) 등이 있다. [그림 2.1.1]은 천창을 통한 자연채광 방식을 보여주고 있다.

2.1.2 측창을 통한 자연광 도입

측창을 통한 자연광 유입으로는 광선반(Light Shelf), 프리즘 유리(Prismatic Glass) 등이 있다. 광선반은 창으로 유입된 태양광을 실내 천장면으로 반사시켜 자연광을 실 안쪽 부분까지 깊숙이 도입시키는 장치이다. 특히 광선반에서의 광학적 반사를 크게 하고 경사 각도를 알맞게 하여 실 깊숙한 부분까지 자연광을 도달시켜 조명에너지의 절감을 도모한다. [그림 2.1.2]는 광선반을 통한 자연광 유입의 개념을 보여주고 있다. 프리즘 유리는 비교적 위도가 높은 지방에서 사용되며 태양고도에 따라 자연광을 적극적으로 실 안쪽 깊숙이 도입시키기 위하여 개발된 것이다. [그림 2.1.3]은 프리즘 유리를 통한 자연광 유입의 개념을 보여주고 있다.

2.1.3 설비형 자연채광 방식과 아트리움

자연광의 도입이 어려운 공간에 자연광을 도입시키기 위한 자연채광 방식을 광덕트(Light Duct) 방식, 광섬유 방식, 태양광 조명장치(Beam Sunlight System), 반사경 방식 등이 있다. 광덕트 방식은 설치비가 비교적 저렴하지만 채광장소가 실내 근거리와 지하에 국한된다. [그림 2.1.4]는 광덕트를 통한 자연광 유입 방식을 보여주고 있다.

광섬유 방식은 태양위치에 맞추어 최적 각도로 제어된 렌즈로 태양 직사광을 집광하고 광섬유에 의해 건물내부로 도입하는 방식이다. 광섬유를 임의로 굴절시킬 수 있어 덕트 공간을 절약할 수 있으나 가격이 매우 비싸다. 다음 [그림 2.1.5]는 광섬유를 이용하는 태양광 추적장치를 보여주고 있다.

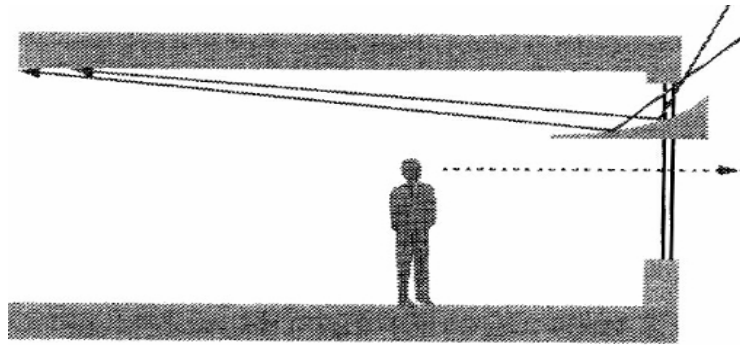
태양광 조명장치(Beam Sunlight System)는 광섬유 방식 보다 저렴하며 건물외벽에 설치하여 건물 깊숙한 곳까지 자연채광을 유입하는 방식이다. [그림 2.1.6]은 태양광 조명장치를 보여주고 있다.

반사경 방식은 건물 상부의 정해진 각도에 배치된 거울을 이용하여 태양 직사광을 도입하는 방식으로 건물이 중층인 경우 유리하고 내부 전체가 밝아진다. [그림 2.1.7]은 반사거울 방식을 보여주고 있다.

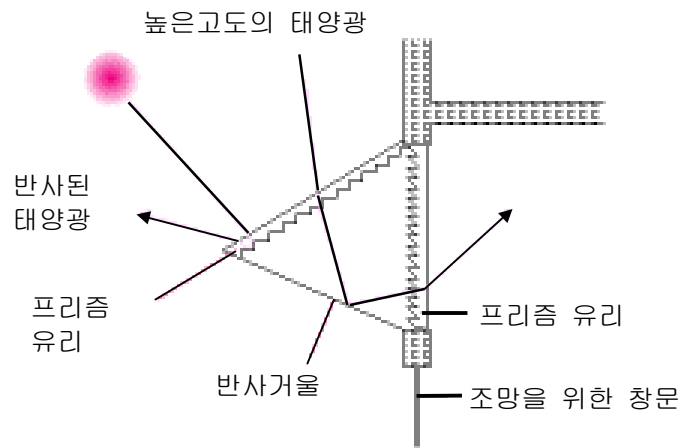
아트리움 형태는 일반적으로 단순형과 복합형으로 나눌 수 있다. 단순형 아트리움으로는 1면형, 2면형, 3면형, 4면형, 선형 아트리움으로 나눌 수 있다. 복합형 아트리움으로는 가교형, 기단형, 복수 수평형, 복수 수직형 아트리움으로 나눌 수 있다. [그림 2.1.8]은 단순형 아트리움의 예를 보인 것이며 [그림 2.1.9]는 아트리움 창호 형태를 보인 것이다.



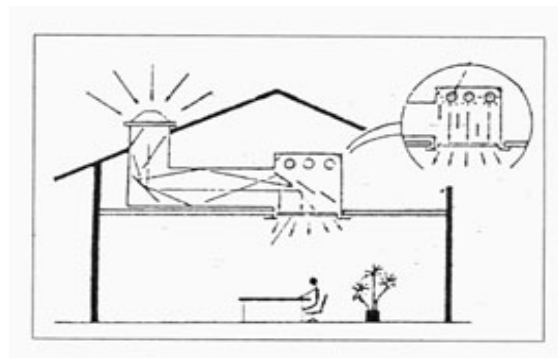
[그림 2.1.1] 천창을 통한 자연채광



[그림 2.1.2] 광선반을 통한 자연채광



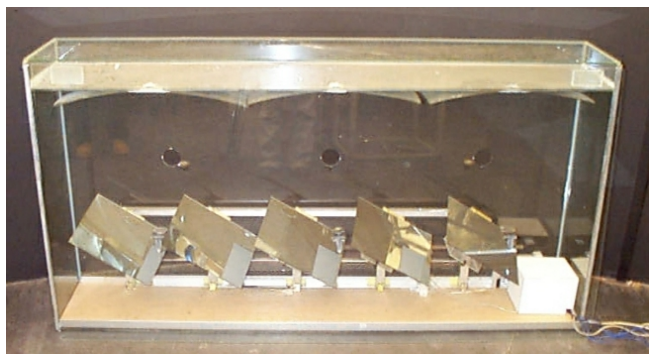
[그림 2.1.3] 프리즘 유리를 통한 자연채광



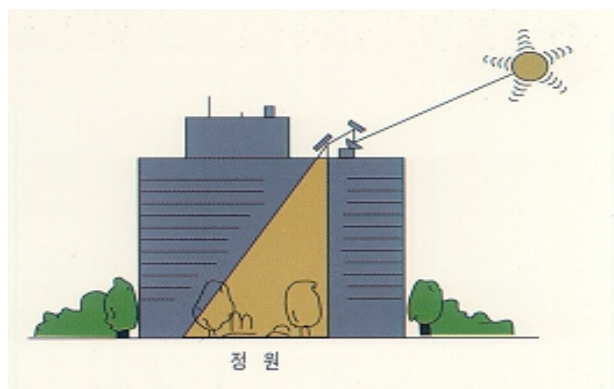
[그림 2.1.4] 광덕트를 통한 자연채광



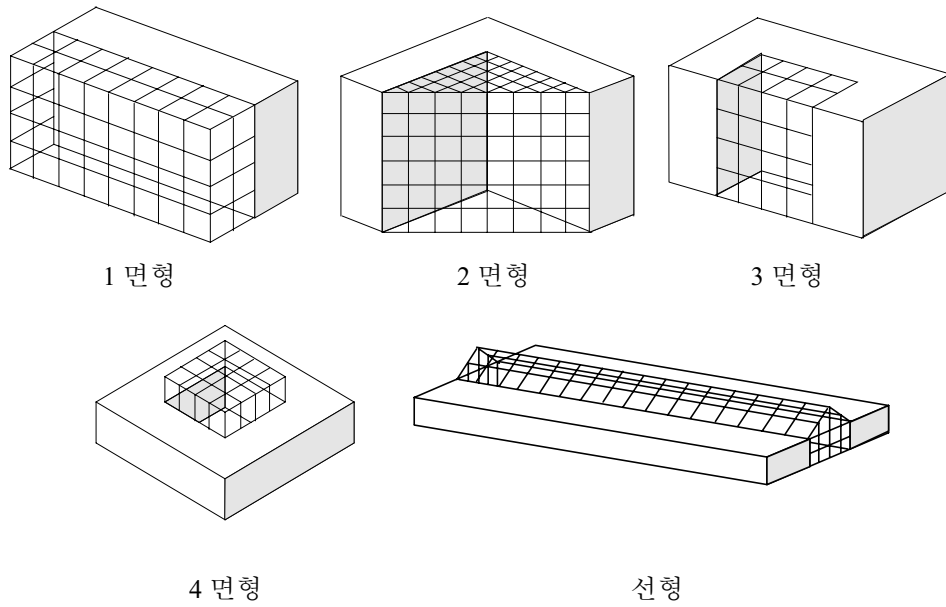
[그림 2.1.5] 광섬유를 이용하는 태양광 추적장치



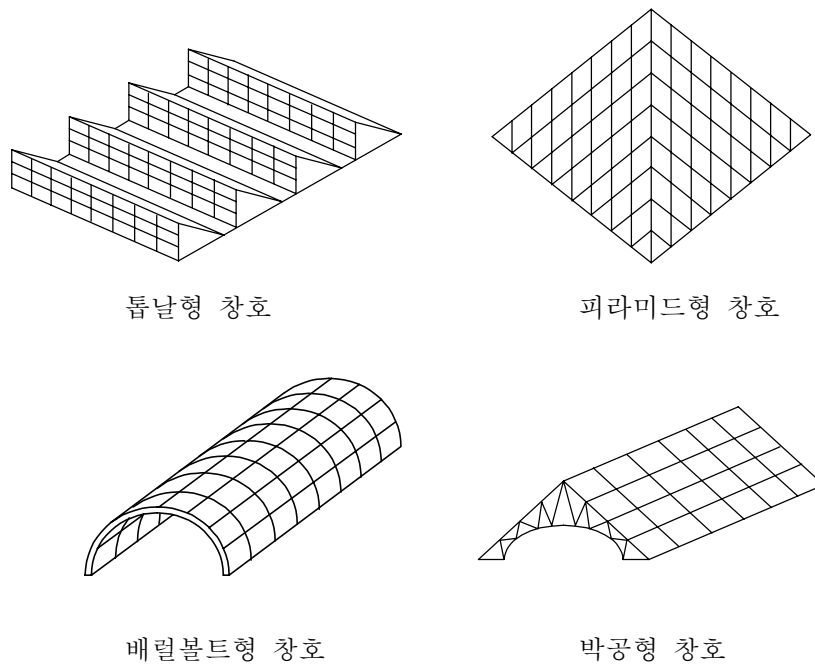
[그림 2.1.6] 태양광 조명장치



[그림 2.1.7] 반사거울 방식



[그림 2.1.8] 아트리움의 예

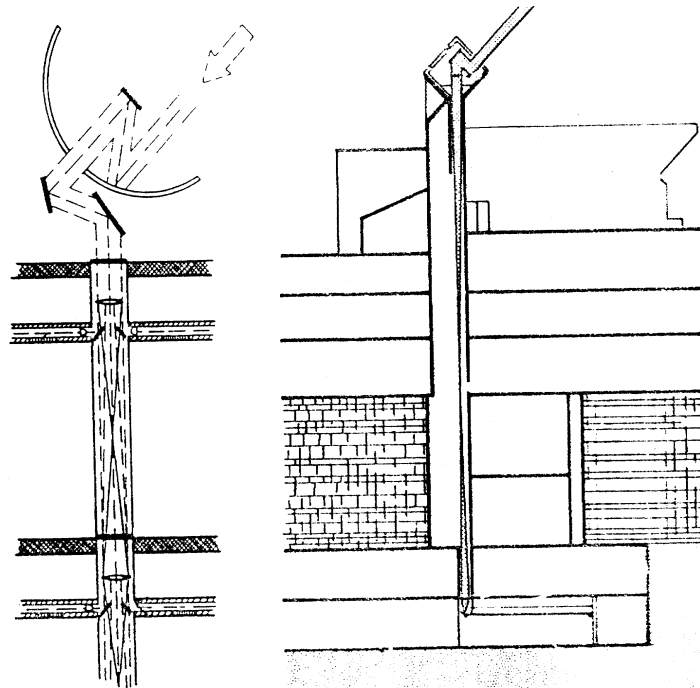


[그림 2.1.9] 아트리움 창호 형태

2.1.4 코어 자연채광 시스템(Core Daylighting System)

코어 자연채광 시스템(CDS)이란 설비형 자연채광 시스템으로 자연채광이 어려운 사무소 건물의 코어 부분과 지하공간 등의 건물 내 깊은 곳에 주광을 효율적으로 전달 시켜 주기 위한 주광전달 시스템을 말한다. CDS 중 직사일광 조명장치(Beam Sunlight System)는 태양의 직달성분만을 이용하는 시스템을 말한다. [그림 2.1.10]은 외국에서 사용하는 CDS 개념도와 미네소타 대학의 적용사례를 보여준 것이다.

태양의 직달성분만을 이용하는 Beam Sunlight System의 집광장치 부분이 본 연구의 주요 내용이며 이에 대한 컴퓨터 모델을 개발 하였고 실험을 통하여 컴퓨터 모델의 타당성을 검증하였으며, 집광장치의 성능해석에 사용된 기본 개념이다.



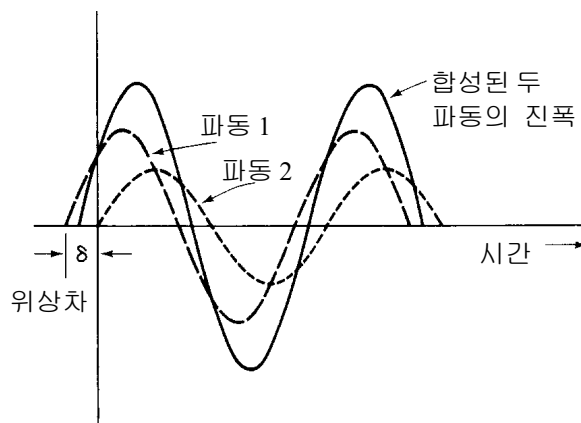
[그림 2.1.10] CDS의 개념도와 적용사례

2.2 빛 이론

본 연구에서 사용되며 2.5 절에 언급되는 광선추적기법은 빛의 특성 중 입자성 (광양자성)을 토대로 하여 어떤 입자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화 시켜 공간 내에서 입자의 운동 경로를 수학적으로 예측하는 기법이다. 하지만 이 장에서 빛의 파동성을 고려하는 이유는 빛이 광학장치에 의해 반사, 투과, 굴절을 통하여 방향을 전환하였을 때 빛의 파동성에 의해 인근의 빛과 간섭을 일으켜 때에 따라 상쇄 되거나 증폭됨에 따른 에너지가 손실 또는 증폭 될 수 있는지에 대하여 검토하기 위함이며 빛의 굴절도 파동성 때문에 일어나는 현상이며 이를 설명하기 위함이다. 미리 결론을 말하면 때에 따라 빛이 상쇄 또는 증폭되거나 결과적으로 에너지 손실은 없다 (장수 외 1997).

2.2.1 빛의 파동성

동일한 진동수를 갖는 두 싸인함수꼴 파동의 합성은 [그림 2.2.1]과 같이 다시 싸인함수꼴의 파동이 되며, 동일한 진동수를 가지만 새로운 진폭 A와 새로운 위상각을 갖게 된다. 이런 파동이 생성되고 전파되고 수신되는 실제 빛은 강도 I로 측정되며 빛의 강도는 (식 2.2.1)과 같이 진폭 A의 제곱과 비례한다.



[그림 2.2.1] 동일한 진동수를 갖는 두 싸인함수꼴 파동의 합성

$$I \propto A^2 \quad (\text{식 2.2.1})$$

따라서 두 파동의 위상차가 0 일 때는 (식 2.2.2)와 같이 항상 강도가 최대 세기가 된다.

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (\text{식 2.2.2})$$

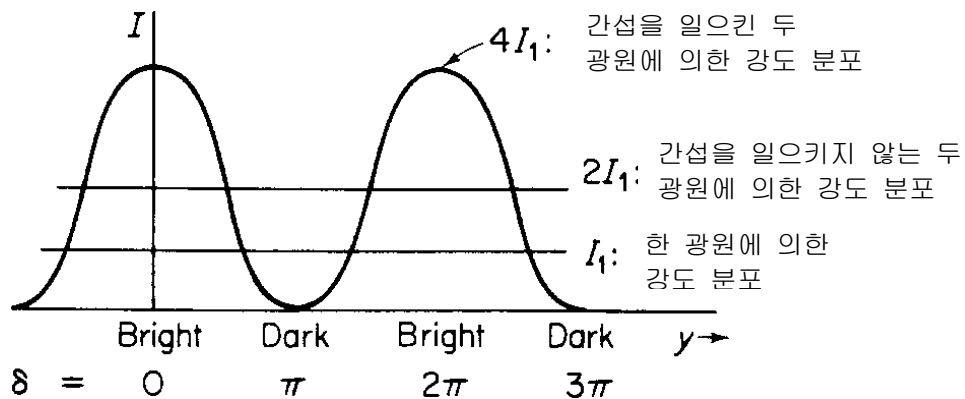
여기서 $I_1 = I_2$ 일 때, $I_{\max} = 4I_1$ 이 된다.

이와는 달리 위상차가 180° 일 때면 항상 최소 세기인 (식 2.2.3)과 같다.

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (\text{식 2.2.3})$$

여기서 $I_1 = I_2$ 일 때, $I_{\min} = 0$ 이 된다.

싸인 함수꼴 합성 파동의 형태는 [그림 2.2.2]와 같다.



[그림 2.2.2] 싸인 함수꼴 합성 파동 형태

두 광속이 간섭 되어서 일련의 밝은 무늬와 어두운 무늬가 생성된다면 밝은 무늬는 개개의 광속 강도의 4 배가 되며 어두운 무늬의 강도는 0 이 된다. [그림 2.2.2] 와 같이 결과적으로 $2I_1$ 으로 표시된 곡선과 $4 I_1$ 으로 표시된 곡선 아래의 면적을 나타내는 두 적분값은 동일하다. 따라서 실제에 있어서는 “보강”간섭이나 “소멸”간섭과 같은 표현을 사용해서는 안된다. 이는 어떤 면에서는 빛이 “파괴”될 수 있다는 의미로 보인다. 그렇지만 그렇지는 않다. 임의의 지점에 빛이 전혀 도달하지 않는다면, 다른 지점에는 더 많은 빛이 도달하게 된다. 간섭이란 단지 빛의 재분배를 야기시킬 뿐이다 (장수 외 1997).

따라서 때에 따라 빛이 상쇄 또는 증폭 되나 결과적으로 에너지 손실은 없다.

빛이 한 매질에서 다른 매질로 들어갈 때 빛의 속력이 변하기 때문에 굴절현상이 일어난다. 같은 매질이라도 온도가 달라서 밀도가 변하면 역시 빛의 진행 방향이 꺾인다. 이것을 빛의 굴절이라고 한다 (공창식 외 1997).

2.2.2 빛의 입자성(광양자설)

빛의 파동적 성질로서는 광전효과를 설명할 수 없다는 것을 알게 된 아인슈타인은 1905년 플랑크의 양자가설을 빛에 적용하여 빛도 입자적 성질(광자, 광양자)을 갖게 됨을 제안하였다 (김종오 1997). 또한 진동수가 f 인 빛은 에너지가 $h \cdot f$ 인 입자이며, 이러한 에너지 입자로서의 빛을 광양자라고 한다. 따라서 본 연구에서 사용되는 광선추적기법은 빛이 일정량의 에너지를 가지는 광양자로 하여 최종 작업면까지 빛을 추적하는 것이다.

$$\text{광자의 에너지} : E = hf$$

$$\text{광자의 운동량} : p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

(단, $h = 6.63 \times 10^{-34}$ JS : 플랑크 상수, $c = 3.0 \times 10^8$ m/s : 빛의 속도)

다음 [표 2.1.1]은 빛의 본성에 대한 역사적 견해이다.

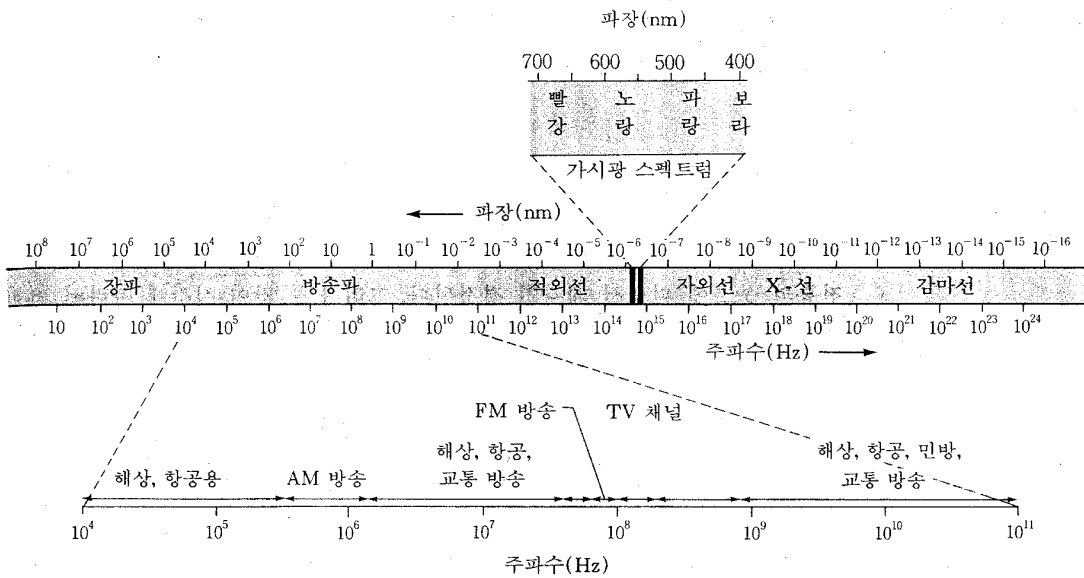
[표 2.2.1] 빛의 본성에 대한 역사적 견해

빛은 파동이다.	빛은 입자이다. → 빛은 광양자이다.
<ul style="list-style-type: none"> • 스넬(1621년)의 굴절법칙 • 그리말디(1618-1663): 빛은 파동과 같은 액체(광액)이며 회절도 일어난다. • 호이겐스(1629-1695): 빛은 매질(에테르) 속을 진행하는 횡파이다. 호이겐스 작도법. • 뢰머(1664-1710): 빛의 진행속도가 일정함을 발견. • 베르누이(1710-1790)와 오일러(1707-1783): 파동설을 지지. • 영(1773-1827): 빛의 파동설을 다시 부활시킴. 빛은 공간을 가득채운 에테르 속을 통과하는 종파라는 가설. 영의 이중슬릿 실험. 불투명한 물체의 가장자리에서 회절을 설명. • 프레넬(1788-1827): 빛에 관한 모든 현상은 빛이 횡파라는 가설로 설명된다고 함. • 브루스터(1781-1868): 반사에 의한 편광의 발견. 후에 빛을 횡파로 보면 해석이 됨을 알게 됨. • 피조, 푸코, 브래들리: 1849년-1862년에 걸쳐 정확한 광속 측정 실험을함. 	<ul style="list-style-type: none"> • 데카르트(1637년): 빛이 빠른직선운동을 하는 미립자의 흐름이라는 생각 • 뉴턴:1668년 최초의 반사망원경 설계. 1672년 프리즘으로 백색광의 분해 연구. 1704년 '광학'에서 빛이 미세입자로 구성되어 있고 발광체에서 복사한다고 봄. 뉴턴환(ring)에 대한 설명에 한계를 지남. 뉴턴 이후 약 1세기간 빛의 입자설이 지지되었다. <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <ul style="list-style-type: none"> • 플랑크: 흑체복사를 설명하기 위해 에너지 양자 가설을 도입함. • 아인슈타인: 1905년 빛은 파동으로 이루어진 알맹이라는 광양자 가설 제시로 광전효과 설명. 빛의 진동수에 비례하는 에너지 입자라는 점에서 뉴턴의 입자설과 다르다. • 컴프턴: 1922년부터 X선의 산란 연구로 컴프턴효과 발견
<p>현대의 해석 : 빛은 파동과 입자의 이중성을 가진다.</p>	
<p>빛의 파동성-간섭, 회절, 편광 등이 있으나 이것은 입자적인 해석으로 설명되지 않는다. 빛의 입자성-광전효과, 컴프턴효과 등이 있으나 이것은 파동적인 해석으로 설명되지 않는다. 빛은 서로 양립 할 수 없는 측면, 즉 파동과 입자의 이중성을 가지고 있다.</p>	

2.2.3 빛의 이중성

빛은 입자(particle)라고 주장한 아이작 뉴턴(Isaac Newton, 1643~1727)에 상반된 주장으로 뉴턴과 동시대의 크리스티안 호이겐스(Christiaan Huygens, 1629~95)는 전파하는 빛은 광원으로부터 모든 방향으로 퍼져 나가는 파동이라고 파동설을 주장하였다. 또한 제임스 클라크 맥스웰(James Clerk Maxwell, 1831~79)은 전자기파(Electromagnetic waves)의 개념을 도입하여 빛도 전자기 에너지의 한 형태에 지나지 않는다고 주장하였다(현대광학, 1997, pp.11~13). 따라서 빛의 영역은 좁은 의미로는 가시광선과 적외선, 자외선을 포함하여 취급되지만, 넓은 의미로는 전자기파 전체를 포함하여 취급된다.

전자기파는 [그림 2.2.3]과 같이 전파로부터, 적외선, 가시광, 자외선, X-선 및 감마선에 이르기까지 전 영역을 이룬다.



[그림 2.2.3] 전자기 스펙트럼의 진동수와 파장별 영역

이와 같이 빛의 현대적 개념은 뉴턴과 호이겐스의 양설을 모두 포함하므로 이를 빛의 이중성(二重性, duality) 이라고 한다. 광전 효과(photoelectric effect), 콤프턴(Compton)효과는 빛의 입자성을 나타내는 좋은 예이며, 빛의 간섭, 회절 현상은 빛의 파동성을 나타내는 좋은 예이다.

20 세기에 들어서 플랑크(Planck), 아인슈타인(Einstein), 보어(Bohr)가 개척한 빛의 양자론에 따르면 전자기 에너지는 양자화(양자화, quantization)되어 있으며, 그 에너지는 광자(광자, photon)라고 하는 이산적(이산적, 띄엄띄엄, discrete) 양으로만 전자기장에 존재한다. 전자기 스펙트럼의 진동수와 파장에 따른 양자 에너지 (Quantum energy)영역 관계는 [표 2.2.2]와 같다.

따라서, 광학은 편의상 3 부분으로 나누어, 각각 그 분야에 알맞은 이론으로 연구 발전되고 있다. 기하광학(기하광학, geometrical optics)은 빛이 광선이라는 개념에 입각한 방법으로 다루게 되며, 파동 광학(파동광학, wave optics)는 빛의 본질을 파동의 개념으로 기초 이론과 여러가지 현상을 다루고 있으며, 양자광학(양자광학, quantum optics)은 빛의 양자론적 본질과 빛의 흡수와 방출을 포함하는 빛과 물질과의 상호작용(interaction)을 다루고 있다.

[표 2.2.2] 전자기 스펙트럼 선과 양자 에너지 영역

복사선의 종류	진동수	파 장	양자 에너지	
전파 부분	라디오파	$10^9 \text{ Hz} >$	$300\text{mm} <$	$0.000004 \text{ eV} <$
	마이크로파	$10^9 \text{ Hz} \sim 10^{12} \text{ Hz}$	$300\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$	$0.000004 \text{ eV} \sim 0.004 \text{ eV}$
광학 부분	적외선	$10^{12} \text{ Hz} \sim 4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$300\mu \sim 0.7\mu$	$0.004 \text{ eV} \sim 1.7 \text{ eV}$
	가시광선	$4.3 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$0.7\mu \sim 0.4\mu$	$1.7 \text{ eV} \sim 3.1 \text{ eV}$
	자외선	$7.5 \times 10^{14} \sim 10^{16} \text{ Hz}$	$0.4\mu \sim 0.03\mu$	$3.1 \text{ eV} \sim 40 \text{ eV}$
방사선 부분	X-선	$10^{16} \text{ Hz} \sim 10^{19} \text{ Hz}$	$300\text{\AA} \sim 0.3\text{\AA}$	$40 \text{ eV} \sim 40,000 \text{ eV}$
	감마선	$10^{19} \text{ Hz} <$	$0.3\text{\AA} >$	$40,000 \text{ eV} <$

* 각 영역은 적절히 구분한 것으로 절대적인 것은 아님.

2.3 외부 조도

2.3.1 개요

에너지 효율적인 설계에 대한 관심의 증가로 인해 자연채광에 대한 많은 연구가 수행되어져 왔다. 자연채광 효과를 예측하기 위해서는 천공 휘도 분포 및 외부 조도 데이터에 관한 항목이 필요하지만 기상대의 측정치나 건축물의 공조부하계산에 이용되고 있는 평균년 기상자료에는 항목이 없다. 따라서 많은 천공 모델들이 개발되어 다양한 상태의 실제 천공 조건에 대해 가장 접근한 결과를 얻을 수 있도록 한 연구들이 있으며 그 중 가장 접근한 결과를 얻을 수 있는 모델은 Perez의 천공 모델(Perez et al. 1990, 1993)이라고 할 수 있다.

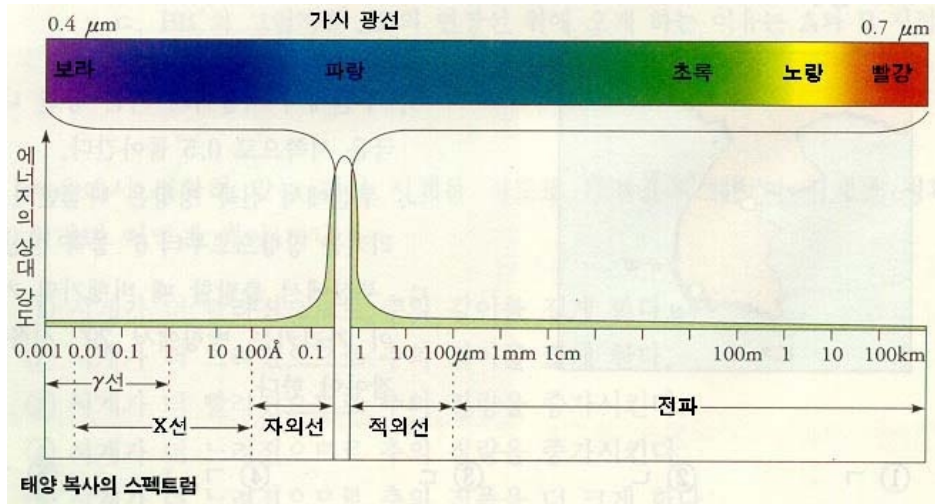
본 연구의 핵심인 태양광 전달장치 중 집광장치는 태양 법선면 직사일광 조도 값을 알아야 시스템 성능을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Perez의 천공 모델을 사용하여 외부 태양 법선면 직달조도를 계산하였다.

다음은 태양복사 에너지에 의해 지구가 받는 일사량과 발광효율에 대하여 설명하고 지구대기를 통과한 태양복사 에너지의 흡수 및 산란에 따른 주광을 계산하기 위하여 Perez 모델을 설명하였다. 또한 Perez 모델을 사용하여 일사량과 노점온도를 이용한 태양법선면 조도를 계산한 결과를 부록에 제시하였다.

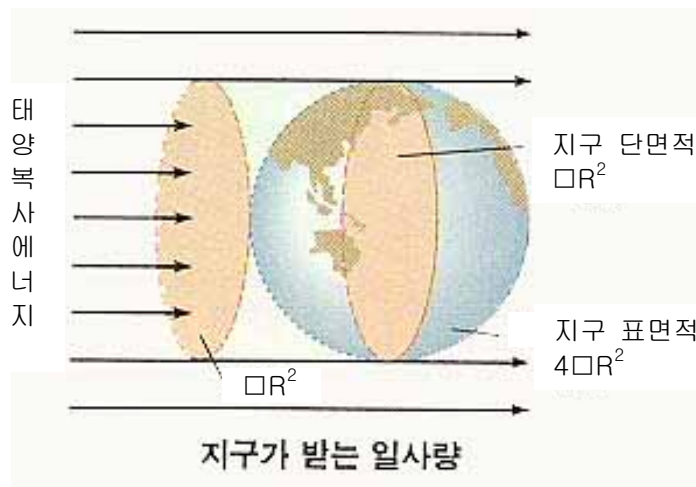
2.3.2 태양 복사 에너지

① 태양복사에너지의 구성

태양복사에너지의 구성은 [그림 2.3.1]과 같이 파장에 따라 γ 선, X선, 자외선, 가시광선, 적외선, 전파와 같은 전자기파로 이루어져있다. 태양복사에너지는 0.25~2.5 μm 의 파장범위 약 95%가 분포되어 있고 그 중 가시광선의 파장 범위는 0.4 ~ 0.74 μm 로 좁은 범위에 있지만 태양에서 방출하는 총 복사에너지량의 약 50%를 차지한다. [그림 2.3.2]와 같이 지구가 받는 태양복사энер지를 일사량이라고 하며 지구 대기권 밖에서 햇빛에 수직인 면 1 cm^2 가 1분 동안에 받는 복사에너지를 태양 상수라 하고, 그 값은 2 $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ 이다.



[그림 2.3.1] 태양복사에너지



[그림 2.3.2] 일사량

따라서 지구가 받는 일사량은 지구의 반지름을 R 이라고 하면 태양 복사 에너지를 수직으로 받는 지구의 면적은 πR^2 이 된다. 또한 태양 상수를 I 라 하면, 1 분 동안에 지구가 받는 태양 복사에너지의 양은 $\pi R^2 \cdot I$ 이다.

② 태양복사에너지의 흡수

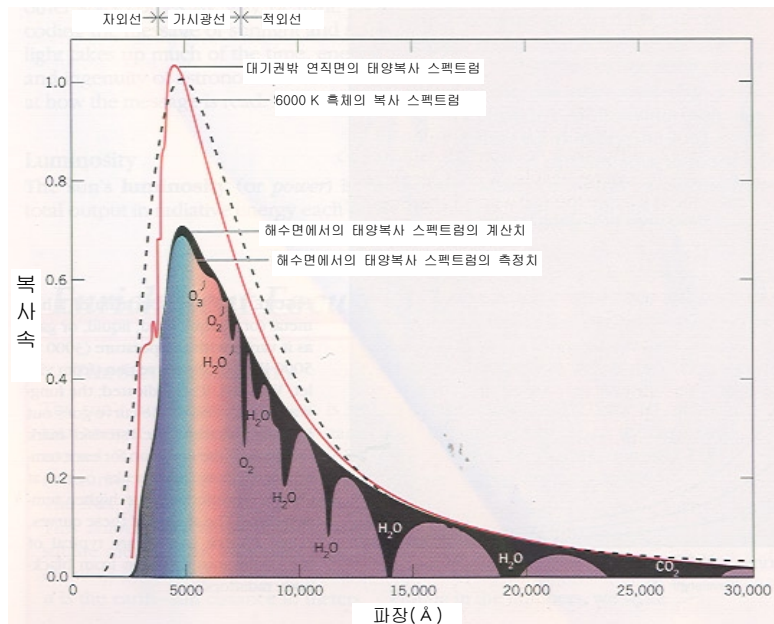
태양복사에너지가 지구 전체의 표면에 고르게 분포된다면 1 cm^2 의 면적이 1분 동안 받는 평균에너지량은 '1분 동안에 받는 총 에너지/지구의 표면적'이다. 그러나 이중의 약 30%는 반사와 산란에 의해서 지구 밖으로 나가기 때문에 나머지 70%에 해당하는 $0.35\text{ cal/cm}^2\text{ min}$ 만이 지표면에 흡수된다.

아래의 [그림 2.3.3]과 같이 대기권 밖의 태양복사곡선과 지표의 태양복사곡선이 다르게 나타나는 것은 지구에 입사되는 태양 복사 에너지 중에서 일부가 대기의 기체성분과 구름 먼지 등에 의해서 반사 산란 흡수되기 때문이다. 그러므로 지표면에서 관측한 태양복사에너지의 파장에 따른 분포는 왼쪽 그림과 같이 대기권 밖에서 측정한 값보다 줄어든다.

⇒ γ 선, X 선, 자외선은 질소나 산소, 오존 등이 흡수된다.

⇒ 적외선은 이산화탄소나 수증기 등에 의해 흡수된다.

⇒ 전파의 흡수와 반사 파장이 $20\ \mu\text{m}$ 이상 되는 전파는 전리층에 의해 흡수되거나 반사된다.



[그림 2.3.3] 대기권을 통과한 태양복사에너지의 파장별 분포

2.3.3 발광효율

일사에 관한 정보는 기상자료와 계산식에 의해 구할 수 있다. 그러므로 일사 상태와 그 결과 야기되는 조도 상태 사이의 상호관계로부터 외부조도를 구할 수 있다. 조도는 대부분 일사량에 따라 달라지므로 일사에 의해서 조도를 구하는 방법을 정립하는 것이 바람직하다. 따라서 전체 일사량에 대한 조도의 관계를 나타내는 발광효율(LE: Luminous Efficacy)의 값을 안다면 직달 일사량과 천공 일사량을 각각 직사일광 조도와 확산천공광 조도로 변환시킬 수 있게 된다 (Perez et al. 1990, 1993).

주광의 발광효율이란 수평면 일사량에 대한 수평면 조도의 비를 말하며 일사 에너지의 분광분포를 알 경우 발광효율(LE) η [lm/W]은 (식 2.3.1)로 정의된다 (Treado and Kusuda, 1981).

$$\eta = \frac{680 \int_{380}^{780} \phi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (\text{식 2.3.1})$$

단, 680 : CIE 최대 시감도 (555nm 에서 680 lm/W)

$V(\lambda)$: 파장 λ 의 단색복사의 CIE 표준 비시감도(0 ~ 1)

$\phi(\lambda)$: 파장 λ 의 복사속 (W/λ)

2.3.4 Perez 천공 모델

CIE 표준 천공은 단지 청천공(Clear Sky), 부분적으로 구름낀 천공(Partly Cloudy Sky), 담천공(Overcast Sky)에 대한 것만을 포함하고 있기 때문에, 좀더 정확하고 다양한 상태에 대한 것을 나타내기 위해 Perez 는 담천공에서 청천공에 이르는 모든 천공 휘도 분포의 변화를 설명하기 위한 모델을 만들었다. 그들은 태양 천정각(z), 대기의 청정도(ϵ), 천공의 밝기(Δ) 및 대기의 수증기량(W)의 4 가지 인자를 가지고 천공 청정도의 값과 일사 상태를 이용하여 완전히 흐린 날에서 매우 청정한 날까지 8 단계로 구분된 천공상태(천공 청정도 단계 1-8)로 분류하고 있다. 천공의 청정도, 천공의 밝기, 대기 수증기량은 (식 2.3.2)~(식 2.3.4)에 의해서 얻어질 수 있다 (Perez et al. 1990, 1993).

$$\epsilon = [(I_d + I_{DN}) / I_d + 1.104Z^3] / [1 + 1.104Z^3] \quad (\text{식 2.3.2})$$

$$\Delta = I_d \times m / I_{ON} \quad (\text{식 2.3.3})$$

$$W = \exp(0.07 \times T_d - 0.075) \quad (\text{식 2.3.4})$$

여기서

I_d : 수평면 확산 일사 (w/m^2)

I_{DN} : 법선면 직달 일사 (w/m^2)

M : 광학적 대기의 두께

I_{ON} : 대기권밖의 법선면 일사(w/m^2)

T_d : 3 시간 동안의 지표면 노점 온도($^{\circ}C$)

태양 천정각(Z)은 다음 (식 2.3.5)에 의해서 계산될 수 있다:

$$Z = (\pi/2) - a_t = (\pi/2) - \{\sin^{-1}[\sin l \sin \delta - \cos l \cos \delta \cos (\pi t / 12)]\} \quad (\text{식 2.3.5})$$

2.3.5)

여기서

a_t = 태양 고도각(rad)

l = 지역의 위도

δ = 태양 적위 t = 진태양시

대기의 청정도를 계산하기 위해서 수평면 확산 일사와 법선면 직달 일사가 필요하다. 국제 기후 센터 중에서 Cornell 대학에 있는 북동부 지역 기후 센터(NRCC, Northeast Regional Climate Center)에서 Meyers 와 Dale 모델을 이용하여 시간별 태양 복사 데이터를 만들었다. Meyers 와 Dale 의 모델은 (식 2.3.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_T = I_{Oh} (\cos Z) T_R T_g T_w T_a T_c \quad \text{(식 2.3.6)}$$

여기서

I_T : 전천 일사량 (w/m^2)	I_{Oh} : 대기권 밖의 수평면 일사 (w/m^2)
T_R : Rayleigh 산란에 의한 투과 계수	T_g : 영구 기체 흡수
T_w : 수증기에 의한 흡수	T_c : 구름에 의한 흡수 및 산란
T_a : 대기중 부유물질에 의한 흡수 및 산란	

시각별 전체 태양 일사의 직달요소와 확산 요소는 전체 태양 일사로부터 각각의 인자를 계산하는 방법인 Erbs 의 방법에 의해서 구할 수 있다. 이 방식은 시간별 청정도 지표(k_T)로 I_d/I_T 의 값을 결정한다. 시간별 청정도 지표는 (식 2.3.7)~(식 2.3.10)에 의해서 얻을 수 있다.

$$k_T = \frac{I_T}{I_{Oh}} \quad \text{(식 2.3.7)}$$

여기서,

k_T : 시간별 청정도 지표
 I_{Oh} : 대기권 밖의 수평면 일사(w/m^2)

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

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

$$= 0.165 \quad (0.8 \leq k_T) \quad (\text{식 2.3.8})$$

$$I_{DH} = I_T - I_d \quad (\text{식 2.3.9})$$

$$I_{DN} = I_{DH} / \sin(a_d) \quad (\text{식 2.3.10})$$

여기서, I_{DH} : 수평면 직달 일사(w/m^2)

천공의 밝기(Δ)를 계산하기 위하여, 광학적 대기의 두께(m)와 대기권 밖의 직달 일사(I_{ON})값이 필요하다. 태양이 천공 천정에 있을 때 복사선이 통과하는 대기의 두께와 임의의 위치에서 통과하는 대기 두께와의 비율인 광학적 대기의 두께는 (식 2.3.11)에 의해서 얻어진다.

$$m = \frac{1}{\cos Z} \quad (\text{식 2.3.11})$$

대기권 밖의 법선면 일사(I_{ON})와 대기권 밖의 수평면 일사 (I_{Oh})는 (식 2.3.12)에서 얻을 수 있다:

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

$$I_{Oh} = I_{sc} \left[1 + 0.33 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \times \cos Z \quad (\text{식 2.3.12})$$

여기서,

I_{sc} : 태양 상수 (1350 W/m^2)

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

일사값을 조도값으로 변환하는 발광효율 모델은 일사량과 8개의 ϵ 에 상응하는 변환 함수를 구함으로써 나타낼 수 있다. 일사 상태에서 변환 함수 (F)는 (식 2.3.13)와 같다.

$$F(\epsilon, \Delta, Z, W) = a_i(\epsilon) + b_i(\epsilon)f(W) + c_i(\epsilon)g(Z) + d_i(\epsilon)h(\Delta) \quad (\text{식 2.3.13})$$

여기서

f, g, h : 연속 함수 a_i, b_i, c_i, d_i : 불연속 함수

함수 F는 기후 환경의 다양함을 나타내는 많은 데이터들을 최소 자승법을 통하여 얻어질 수 있다. 변환 함수로 법선면 전체, 확산, 직달 일사로부터 각각 법선면 전체, 확산, 직달 조도를 구할 수 있다. 수평면 직달 조도(E_{dH})와 수직면 직달 조도(E_{dV})는 다음과 같이 (식 2.3.14)~(식 2.3.16)에서 구할 수 있다.

$$E_{dN} = \text{MAX}\{0, I_{DN}[a_i + b_i W + c_i \exp(5.73Z - 5) + d_i \Delta]\} \quad (\text{식 2.3.14})$$

$$E_{dH} = E_{dN} \times \sin a_t \quad (\text{식 2.3.15})$$

$$E_{dV} = E_{dN} \times \cos a_t \quad (\text{식 2.3.16})$$

여기서

E_{dN} : 법선면 직달 조도 (lux) E_{dH} : 수평면 직달 조도 (lux)

E_{dV} : 수직면 직달 조도 (lux) a_t : 입사각(rad)

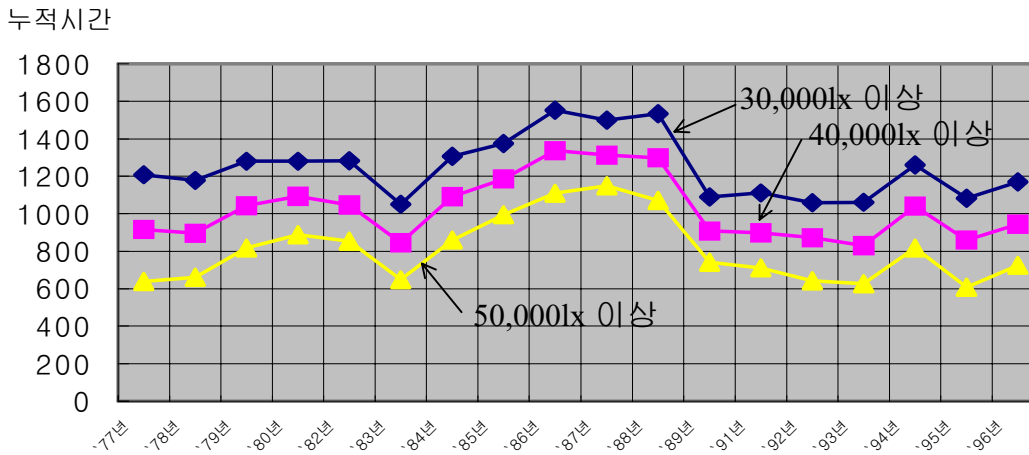
a_i, b_i, c_i, d_i : 실험식에 의해 구해진 계수 (표 2.3.1 참조)

[표 2.3.1] 직달 일사의 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

2.3.5 Perez 천공 모델을 이용한 법선면 직달조도 계산

본 연구에서 Perez 모델을 이용하여 1977년부터 1996년까지의 20년간 태양광의 시각별 법선면 직달조도값을 실제 서울의 기상자료를 입력하여 계산하였으며 결과는 [그림 2.3.4]와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 태양법선면 직달조도 값은 연평균 하루 3시간 이상 30,000lx를 넘는다. 따라서 국내에 설비형 자연채광장치를 사용할 경우 조명에너지 절약에 큰 공헌을 할 수 있을 것으로 사료된다.



[그림 2.3.4] 20년간 태양법선면 직사일광 조도의 출현시간

81년도와 90년도의 값은 평균치보다 너무 차이 나는 값을 보이기 때문에 측정상의 오차로 가정하여 계산에서 제외 시켰다.

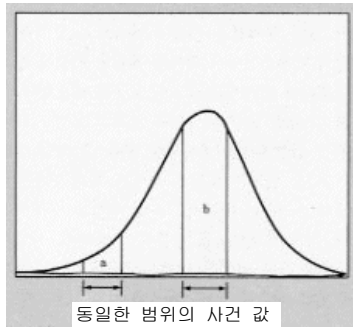
Perez 천공 모델을 이용하여 첨부에 계산된 표에 의해서 간단하게 서울지역의 태양 법선면 직달조도값을 계산할 수 있다. 부록에 있는 표의 이용방법은 알고자 하는 시간과 일사량 및 노점온도 근처의 조도값을 읽은 후 보간 하면 된다.

2.4 몬테카를로 방법

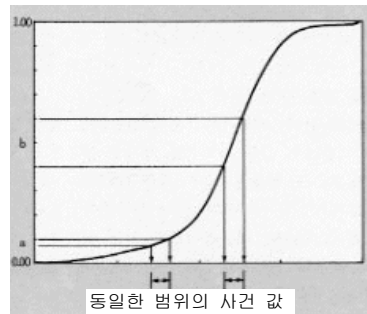
본 연구에서 개발한 컴퓨터 모델의 기본 이론 중 하나인 몬테카를로 방법은 태양광 전달장치의 성능을 정확히 예측하기 위하여 광자발산면에서 균등한 광자를 발산할 때와 최종 작업면까지 광자의 거동을 추적하기 위하여 사용되었다.

어떤 현상이 발생할 통계적인 분포는 [그림 2.4.1]과 같은 정규 분포 함수 또는 다양한 확률 분포 함수로 나타낼 수 있으며, 각 분포 함수는 함수 변환에 의해 [그림 2.4.2]와 같이 확률 누적 함수로 변환 될 수 있다. 따라서, 0에서 1까지의 확률적으로 등분포하는 난수를 컴퓨터 상에서 발생(Random number generation) 시켜 확률 누적 함수에 대응시키면, 컴퓨터 상에서 실제 발생할 현상의 통계적인 분포를 재현할 수 있다. 이러한 원리를 몬테카를로 시뮬레이션이라 하며, 이러한 기본적인 원리를 이용 일어날 수 있는 많은 매개 변수들을 컴퓨터 상에 재현함으로써 컴퓨터 상에서 문제를 해결할 수 있도록 해준다 (김재삼 1997).

몬테카를로 방법을 이용하는데 있어서 중요하게 고려되어야 할 부분 중의 하나는 분포가 균일한 난수를 발생시키는 것이다. 만약 균일하지 못한 편중된 분포를 가지는 난수열을 가지고 몬테카를로 방법을 적용시키면 결과는 왜곡되어 쓸모없는 값이 된다. 따라서 난수는 완전히 무작위적이고 균일한 분포를 가지는 임의의 수열로 이루어지는 것이 가장 바람직하다.



[그림 2.4.1] 정규 분포 함수



[그림 2.4.2] 확률 누적 함수

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 사용되어 왔고 가장 좋은 방법으로 알려져 있다. 어떤 정수 S_i 가 주어졌을 때 이 수열은 (식 2.4.1)과 같다.

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

여기서 a 는 승수(multiplier), c 는 증분(increment), m 은 계수(modulus)라고 부르며 이들은 모두 음이 아닌 정수들이다. $N \bmod m$ 은 N 을 m 으로 나누고 난 나머지를 말한다. 예를 들면 $5 \bmod 3 = 2$, $15 \bmod 10 = 5$ 가 된다.

더러 승수의 적절한 선택은 최대 주기를 갖고 무작위해 보일 수 있게 해준다.

여러 가지 연구에 의해서 얻어진 유명한 난수 생성자들의 승수 a 와 계수 m 을 보면 [표 2.4.1]과 같다.

[표 2.4.1] 선형 합동적 난수 생성자

A	m	c	
23	10^8+1	0	Lehmer
$2^7 + 1$	2^{35}	1	Rotenberg
3141592653	2^{35}	271828128	
65539	2^{29}	0	RANDU – IBM/360
69069	2^{32}	1	Marsaglia – VAX
16807	$2^{31} - 1$	0	SURAND – IBM/360
1664525	2^{32}	0	IMS
742938285	$2^{31} - 1$	0	l'Ecuyer
515	2^{47}	0	CDC

이외에도 난수 발생 방법으로 Fibonacci 수열, Tausworthe의 레지스터 자리이동 방법, 빌러빼기 방법 등이 있다.

2.5 광선추적기법을 이용한 광학장치에서 빛의 거동 해석

광선 추적기법(Ray-tracing Technique)은 어떤 입자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화시켜 공간 내에서 입자의 운동 경로를 수학적으로 예측할 수 있는 기법이다.

2.5.1 직선과 평면의 만남

빛의 직진성을 고려하여 광자의 운동형태를 3 차원 직선방정식으로 나타낼 수 있는데, 이때 광자의 운동방향과 평면과의 기하학적 관계를 계산할 때 공간의 직선방정식과 평면방정식을 적용시킬 수 있다.

우선 3 차원 공간상에서 진행하는 하나의 광자를 3 차원 직선의 식으로 나타내면 (식 2.5.1)또는 (식 2.5.2)와 같다.

$$\frac{x-x_0}{L} = \frac{y-y_0}{M} = \frac{z-z_0}{N} \quad (\text{식 2.5.1})$$

$$\frac{x-x_0}{dx} = \frac{y-y_0}{dy} = \frac{z-z_0}{dz} = t \quad (\text{식 2.5.2})$$

($x = x_0 + dx \times t$, $y = y_0 + dy \times t$, $z = z_0 + dz \times t$ 로 변형된다)

그리고 평면의 방정식은 (식 2.5.3)과 같다.

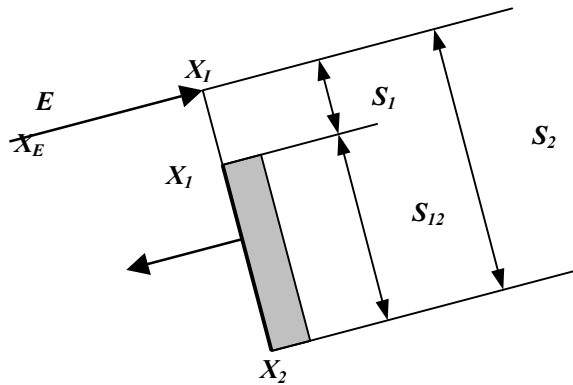
$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (\text{식 2.5.3})$$

(여기서 A,B,C 는 법선의 방향비가 된다)

(식 2.5.4)에 의해 t를 구하고 직선의 방정식에 대입하면 직선과 평면이 만나는 점의 좌표(x,y,z)를 구할 수 있으며 이 (x,y,z) 가 평면상에 존재하는지를 검사함으로써 직선과 평면이 교차하는지를 결정할 수 있게 된다.

$$t = \frac{-(Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D)}{A \times dx + B \times dy + C \times dz} \quad (\text{식 2.5.4})$$

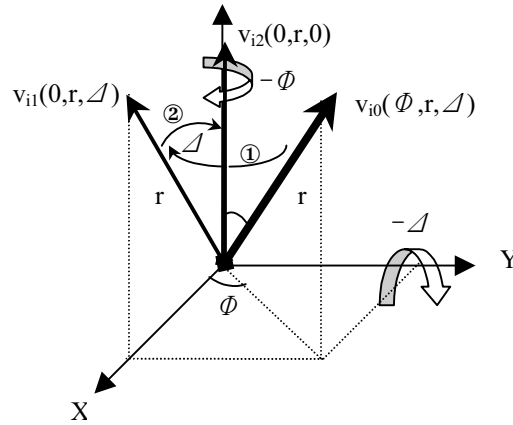
이 (x,y,z) 가 평면상에 존재하는 지의 검사는 [그림 2.5.1]에 보인 것과 같이 $S_1 + S_2 > S_{12}$ 일 경우 광자가 평면의 범위를 벗어남을 알 수 있고, 여기서 S_1 과 S_2 는 $S_i = |X_{iL} - X_{iR}|^2$ ($i=1,2$)로 부터 구할 수 있다.



[그림 2.5.1] 광자가 평면의 범위안에 들어오는가를 검사

2.5.2 평면에서 반사한 광자의 방향 결정

평면에서 광자의 반사는 평면 교점의 법선 벡터(Z 축)에 대하여 180° 회전시키면 된다. 평면의 법선 벡터에 대한 회전을 하기 위하여 법선 벡터를 임의의 축 (x,y,z) 과 평행하도록(여기서는 Z 축) 회전 이동 시킨 후에 이 회전에 이용된 매트릭스를 그대로 같이 직선의 벡터에 적용하면 반사된 벡터를 구하게 된다. 즉, [그림 2.5.2]와 같이 임의의 (dx,dy,dz) 라는 벡터를 z 축과 평행하도록 만들기 위해서 먼저 $V_{i0}(\phi, r, \angle)$ 를 구한다. 다음 $-\phi$ 만큼 z 축에 대하여 회전하며 $V_{i1}(0, r, \angle)$ 이 되며, 다시 $-\angle$ 만큼 y 축에 대하여 회전 시키면 z 축이 된다 (전철원 1977).



[그림 2.5.2] 임의의 벡터를 Z 축에 평행하게 만들기

이러한 벡터는 (식 2.5.5), (식 2.5.6)의 매트릭스에 의해 회전 이동한다.

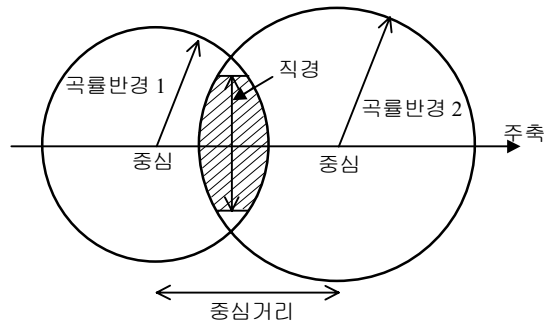
$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{식 2.5.5})$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{식 2.5.6})$$

그 다음 이 회전에 이용된 매트릭스를 그대로 Z 축으로 회전이동 된 벡터에 적용하면 평면의 법선면에 반사된 벡터를 구할 수 있다.

2.5.3 직선과 구의 만남

볼록렌즈의 경우 [그림 2.5.3]과 같이 양면이 서로 다른 두 개의 구의 일부 면으로서 다루어질 수 있다.



[그림 2.5.3] 볼록렌즈의 표시방법

이 경우 직선의 방정식은 (식 2.5.2)와 같고 구의 방정식은 (식 2.5.7)로 표현된다.

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2 = r^2 \quad (\text{식 2.5.7})$$

이를 t 에 대하여 풀면 (식 2.5.8)과 같다.

$$(dx \times dx + dy \times dy + dz \times dz) \times t^2 + 2 \times t \times [dx(x_0 - a) + dy(y_0 - b) + dz(z_0 - c)] + (x_0 - a)^2 + (y_0 - b)^2 + (z_0 - c)^2 - r^2 = 0 \quad (\text{식 2.5.8})$$

t 는 2차 방정식이므로 (식 2.5.9)를 적용시키면 t 를 구할 수 있다.

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (\text{식 2.5.9})$$

t 가 2 개이면 구의 두 점에서 접치는 것이므로 이중 가까운 값을 취하면 된다.
 만일 $b^2 - 4ac$ 가 음수이면 직선과 구면이 만나지 않는 것이다.

2.5.4 렌즈에서의 굴절

렌즈에서의 굴절은 (식 2.5.10)과 같이 스넬의 법칙을 이용하여 해석할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} n \sin \theta_1 = n' \sin \theta_2 \\ n \sin \theta_4 = n' \sin \theta_3 \end{pmatrix} \quad (\text{식 2.5.10})$$

단, n : 공기의 굴절률 (≈ 1) n' : 유리의 굴절률 (≈ 1.5)
 θ_1, θ_3 : 입사각 θ_2, θ_4 : 굴절각

[그림 2.5.4]는 스넬의 법칙에 의해 빛의 굴절되는 경로를 보인 것이다.

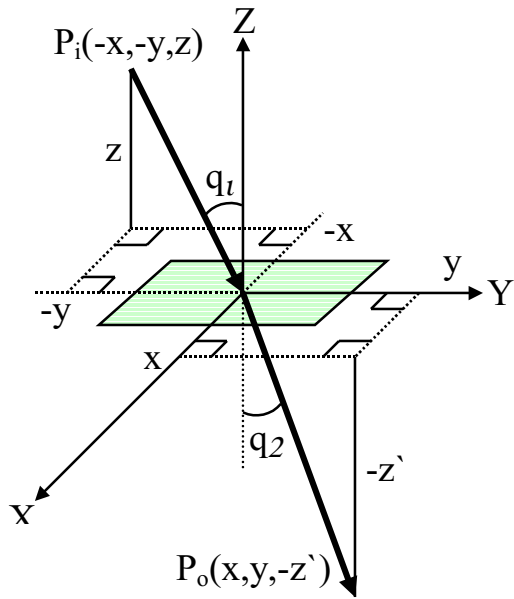
(-x,-y,z)중 -x,-y 값은 부호만 바꾸고 크기는 그대로 하고 스넬의 법칙에 의하여 z'값을 구하면 굴절된 벡터를 구할 수 있다.

렌즈를 통과하는 빛의 경로를 구하기 위하여 먼저 광자가 부딪히는 구면(렌즈의 한쪽면)의 법선을 구한다. 이는 (식 2.5.11)과 같이 중점과 교차점으로 쉽게 구할 수 있다.

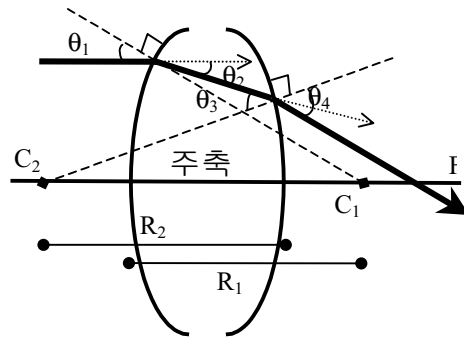
[그림 2.5.5]는 렌즈를 통과하는 빛의 경로를 보인 것이다.

$$\begin{pmatrix} dx = x - cx \\ dy = y - cy \\ dz = z - cz \end{pmatrix} \quad (\text{식 2.5.11})$$

(dx,dy,dz: 법선 벡터, x,y,z: 교차점, cx,cy,cz: 구의 중심)



[그림 2.5.4] 굴절되는 빛의 경로(스넬의 법칙)



(R1,R2 는 반경을 나타내며 C1,C2 는 구의 중심을 나타낸다)

[그림 2.5.5] 렌즈를 통과하는 빛의 경로

다음 이 법선을 $-\phi$ 만큼 z 축에 대하여 회전, $-\angle$ 만큼 y 축에 대하여 회전 시키면 z 축이 된다. 마찬가지로 광자의 벡터도 같은 각도로 회전 시킨다.

그 다음 z 축과의 각도를 (식 2.5.12)를 이용하여 계산한다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right) \quad (\text{식 2.5.12})$$

(식 2.5.13)과 같이 스넬의 법칙인 굴절률을 이용해서 θ_2 가 나온다.

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{n \sin \theta_1}{n'}\right) \quad (\text{식 2.5.13})$$

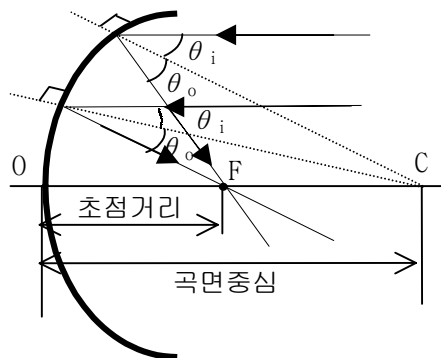
θ_2 를 이용해서 (식 2.5.14)로 z' 를 구한다.

$$z' = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\tan \theta_2} \quad (\text{식 2.5.14})$$

dx, dy 는 그대로 쓰고 dz' 만 변화 시켜준다(길이는 달라지지만, 방향은 동일하고, 계산이 빠르다). 이를 다시 \angle 만큼 y 축에 회전, \emptyset 만큼 z 축에 대하여 회전 시키면 원래대로 돌아온다.

2.5.5 오목거울에서의 빛의 반사

[그림 2.5.6]과 같이 오목거울의 초점거리(F)는 중심(=반경,C)의 1/2 이며 반사특성은 위에서 언급한 광자의 평면에 대한 반사 효과와 같다.



[그림 2.5.6] 오목거울에 반사되는 빛의 경로