

# 강좌

## 식물생산과 관련한 光의 물리학적 용어 및 개념

김 용 현\*

### 1. 서론

최근들어 원예학, 농학, 식물학 등의 분야에서 각종 환경요인에 대한 식물의 생장반응을 연구하기 위한 기초 실험의 상당 부분이 인공광원을 사용한 가운데 이루어지고 있다. 또한 상기의 기초연구 이외에 식물공장에서도 같이 인공광과 태양광의 병용 또는 인공광만을 사용한 식물생산의 상업화에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있는 가운데 조직배양묘, 접목묘, 실생묘 등을 인공광하에서 효율적으로 생산하기 위한 식물묘 생산의 실용화 연구도 수행되고 있다. 그런데 식물생산과 밀접하게 관련된 광(또는 복사)에 관련된 용어의 정의 또는 단위가 물리학, 조명공학, 생물학 등의 전문 분야에 따라 서로 다른 경우가 있으며, 식물을 연구 대상으로 삼는 분야에서도 관련 용어와 단위가 뒤섞여 사용되기도 한다. 즉 하나의 용어가 복수의 의미로 사용되거나, 반대로 하나의 정의에 대해서 다수의 용어가 사용되기도 한다. 이러한 경우 단위가 명확하게 표시되지 않으면 사용된 용어의 의미가 애매하게 전달될 수 있다. 그러므로 식물생산과 관련된 용어 또는 단위의 사용에 혼란이 초래되지 않도록 용어와 단위를 통일하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

예를 들면 광의 강도를 표시할 때 조도가 사용되는가 하면, 단위시간·단위면적당 에너지(복사조도, 복사속밀도, 일사량 등) 또는 단위시간·단위면적당 광량자수(혹은 광량자속밀도, 광합성 유효광량자속밀도)가 혼용되기도 한다. 그러므로 각각의 단위에 대한 분명한 이해와 더불어 표현 목적에 적합한 용

어와 단위를 사용하는 것이 바람직하다. 본고는 식물생산과 관련된 광(또는 복사)의 물리학적 용어, 정의 및 단위 등을 정리하고자 작성되었다.

### 2. 국제 단위계

#### 가. 국제 단위계의 배경

국제 단위계는 국가와 분야에 따라 여러가지 형태로 사용되어 온 단위를 세계적으로 동일하게 통일하고자 1960년에 개최된 제11회 국제 도량형 총회에서 채택된 단위계로서, 보통 SI 단위계로 불리운다. 예를 들면, 기상예보에 등장하는 기압의 단위로서 밀리바(millibar, mb) 대신에 헥토파스칼(hecto-Pascal, hPa)이 사용되는 것은 SI 단위계가 국제적인 단위계로 채택되었기 때문이다. 또한 광과 관련하여 종래부터 사용된 cal, kcal 및 Ly(Langley) 등의 단위는 SI 단위계에 해당되지 않으므로 사라지고, 대신에 J 또는 W 등이 사용되고 있다. 이밖에 광의 파장을 표시할 때 사용되는 단위로서  $\mu$  또는 Å 대신에 nm 또는  $\mu\text{m}$ 가 사용되고 있다.

#### 나. SI 단위계의 구성

SI 단위계는 7개의 기본단위, 2개의 보조단위, 기본단위와 보조단위를 조합시킨 유도단위, 20개의 접두어 등으로 구성된다. 기본 단위는 m, kg, s, A, K, mol, cd의 7개로서 각각 독립적인 차원을 갖는 길이, 질량, 시간, 전류, 온도, 물질량, 광도의 표시에 사용

\* 전북대 농업기계공학과

된다. 보조단위는 기하학적으로 정의된 것으로서, 평면각을 표시하는 라디안(radian, rad)과 입체각을 표시하는 스테라디안(steradian, sr)이 있는 데, 주로 광과 관련된 단위로서 사용된다. 이러한 기본단위와 보조단위를 조합하면 모든 물리량에 대한 단위 표시가 가능해진다. 예를 들면, 압력은  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$  (= Pa), 열량은  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$  (= J)의 단위를 갖는다. 이와 같이 기본단위나 보조단위를 물리 법칙에 의해 대수적인 관계식으로 결합하여 나타낸 것이 유도단위이다. 그런데, 유도단위는 여러 종류의 기본단위가 사용되어 길게 표현되므로 사용할 때 번거롭게 된다. 이와 같은 번거로움을 해소하고자 고유의 명칭을 지닌 19개의 유도단위에 대한 특별한 명칭과 기호가 주어져 있다. 압력, 열량, 힘, 전력, 광속, 조도 등은 대표적인 유도단위를 갖는 물리량으로서 각각 Pa(Pascal), J(Joule), N(Newton), W(Watt), lm(lumen), lx(lux)의 단위를 갖는다.

이러한 단위의 머리에는 숫자의 크기를 쉽게 이해하고자 10의累乘을 나타내는 접두어가 사용된다. 널리 사용되는 접두어로서 G(giga,  $10^9$ ), M(mega,  $10^6$ ), k(kilo,  $10^3$ ), h(hecto,  $10^2$ ), d(dec,  $10^{-1}$ ), c(centi,  $10^{-2}$ ), m(milli,  $10^{-3}$ ), (micro,  $10^{-6}$ ), n(nano,  $10^{-9}$ ) 등이 있다. 원칙적으로 SI 단위계에서는 단일 물리량에 대하여 하나의 단위가 사용된다. 단, 온도의 단위는 예외로서 K(Kelvin degree)와  $^{\circ}\text{C}$ (Celsius degree)의 병용이 허용되고 있다.

다. 사용상의 주의

SI 단위계에서 인명으로부터 유래된 단위는 대문자로 표시되며, 인명 이외의 것으로부터 유래된 단위에는 소문자가 사용된다. 예를 들면 kw, Kw, KW, kW 등이 혼용되고 있는데 w는 인명으로부터 유래된 고유의 조립단위이므로 대문자가 사용되어야 하며, 접두어인 k는 인명이 아니기에 소문자가 적합하므로 kW가 정확한 표시에 해당된다. 또한, 조도의 단위로서 lx가 정확한 표현에 해당되며, lux, Lux, Lx 등은 모두 부정확한 표기이다.

3. 복 사

광을 언급할 때 복사라는 용어가 자주 등장한다. 복사라는 것은 물체로부터 방출된 모든 전자파 또는 전자파가 방출되는 현상을 의미한다. 전자파는 전자장의 진동에 의해서 진공중 또는 물질을 통과한다. 기본적으로 광은 전자파의 한 종류에 해당되므로 복사의 한 형태를 이루게 된다. 전자파는 진공중에서 광속으로 전달되며, 그림 1과 같이 파장에 따라 구분된다. 파장은  $10^{-16}\text{m}$ 로부터 數km 이상에 이르기까지 다양하며, 감마선, X선, 자외선, 가시광, 적외선, 레이더, 방송용 전파 등이 전자파에 포함된다.

한편 열 전달의 관점에서 복사는 물질의 이동이 수반되지 않는 가운데 공간을 통한 에너지의 전달을 의미한다. 절대온도가 0 K가 되지 않는 한, 식물 또는 지면 등 모든 물체가 복사의 형태로 에너지를 방출한다.

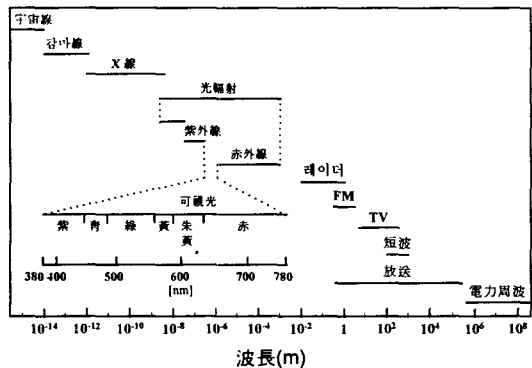


그림. 1 전자파의 파장과 구분.

4. 광복사 및 파장 구분

국제조명위원회(CIE)는 전자파 가운데 파장 1 nm ~ 1 mm의 범위를 광복사로 정의하였다(CIE, 1987). 광복사는 그림 2와 같이 파장에 따라 자외선, 가시광 및 적외선으로 구분되나, 구분에 사용되는 파장의 한계는 여러 주장에 따라 다소 차이가 있다.

좁은 의미에서 광은 인간의 눈에 감지되는 영역, 즉 가시광을 의미하나 넓은 의미에서는 가시광에 자

외선과 적외선이 포함된 광복사를 의미한다. 그러므로 엄밀한 구분이 요구될 때에는 파장 범위가 명확한 용어의 사용 또는 파장의 표시가 바람직하다.

광은 파동과 입자의 성질을 모두 지니고 있다. 광의 간섭, 회절, 편광 등의 현상은 광의 파동 특성에 해당되며, 광전효과는 광의 입자 특성에 해당된다. 광의 입자 특성과 관련하여 입자의 최소단위가 광양자(light quantum) 또는 광자(photon)로 불리우므로, 광합성과 관련한 광의 크기는 광양자수에 의해서 표시하는 것이 적절하다.

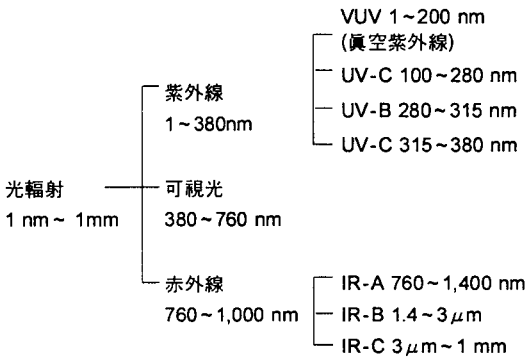


그림. 2 광복사의 파장에 따른 구분.

### 가. 가시광

가시광(visible light)은 인간의 눈에 감지되는 파장 영역으로서, 380~760 nm (조명과 관련해서는 380~780 nm로 표시되는 경우가 많다)의 파장을 갖는다. 인간의 눈은 555 nm의 파장을 갖는 광에 대한 감도가 가장 높으며, 이 파장으로부터 멀어질수록 감도는 저하된다. 한편 광원의 복사강도를 증대시키면 감지되는 파장 영역이 넓어지므로 눈이 감응할 수 있는 파장 영역을 명확하게 구분하는 것은 불가능하다.

380~760 nm의 파장 영역은 인간의 눈에 감지되는 색상에 따라 자주색(380~410 nm), 남색(410~450 nm), 청색(450~500 nm), 녹색(500~570 nm), 황색(570~590 nm), 주황색(590~640 nm) 및 적색(640~760 nm)의 7색으로 구분되나, 하나의 색으로부터 다른 색으로의 변화는 연속적이므로 상기의 구분은 편

의적인 구분에 해당된다.

### 나. 적색광 및 원적색광

식물의 분화, 발달, 신장, 종자 발아 등과 같은 특성은 적색광 부근의 파장 영역에서도 파장에 따라 그 특성이 다르게 나타나는 데, 이 가운데 약 600~700 nm의 파장 영역은 적색광, 약 700~760 nm(또는 700~800 nm로 표시되는 경우도 있다)의 파장 영역은 원적색광으로 불리운다.

임의의 광원에서 730 nm의 원적색광에 대한 660 nm의 적색광의 광양자속 비율을 조절하면 식물의 종자 발아, 節間 伸長, 葉의 展開, 花芽의 形成 등의 반응이 다르게 나타나는 데 이와 같은 반응을 光形態形成(photomorphogenesis)이라 한다. 보통 식물의 葉群에 의해서 400~700 nm의 광합성 유효광양자의 대부분이 흡수되므로 근락내부에서는 원적색광이 풍부해진다. 원적색광에 대한 적색광의 비율이 작을 때 식물의 신장생장이 촉진되나, 크게 되면 생장이 억제된다. 그러므로 광환경의 원적색광에 대한 적색광의 비율을 변화시키면 식물의 광형태형성 제어가 가능하다.

### 다. 자외선

자외선(ultraviolet radiation)의 파장 영역은 1~380 nm이나, 파장 하한은 명확하지 않다. 일반적으로 가시광에 가까운 파장으로부터 UV-A(315~380 nm), UV-B(280~315 nm), UV-C(100~280 nm)로 불리운다. 한편 파장 200 nm 이하의 자외선은 공기 또는 물에 의해서 흡수되고, 진공상태가 아니면 존재하지 않으므로 진공자외선에 해당된다. 이밖에 300~380 nm와 200~300 nm의 파장을 갖는 자외선은 각각 근자외선과 원자외선으로 불리운다.

### 라. 적외선

적외선(infrared radiation)의 파장 영역은 약 765 nm~1 mm으로서, 많은 열에너지를 지니고 있기 때

문에 열선으로도 불리운다. 가시광에 가까운 적외선으로부터 IR-A(760~1400 nm), IR-B(1.4~3 μm), IR-C(3 μm~1 mm)로 불리운다. 적외선 가운데 약 760~3 μm의 파장 영역은 근적외선으로서 식품의 성분 분석에 널리 활용되고 있으며, 3 μm 이상의 파장 영역은 원적외선에 해당된다.

마. 광합성 유효복사

400~700 nm에 해당되는 파장 영역은 녹색식물의 광합성에 작용하므로 이러한 파장 영역을 광합성 유효복사(photosynthetically active radiation, PAR)라 일컫는다. 광합성 유효복사의 파장 영역은 가시광의 파장에 비해서 다소 작다. 그림 3은 광합성의 작용 스펙트럼을 나타낸 것으로서 각 파장의 광이 광합성에 미치는 효과를 나타낸 것이다. 즉 각 파장에 따라 동일한 광합성속도를 나타내는 입사에너지를 구한 후 단위입사 에너지당 광합성속도의 상대치를 파장별로 표시한 것이다. 그림으로부터 광합성을 위한 광의 이용효율은 450~680 nm의 파장 영역에서 비교적 높으나, 광합성 유효복사의 경계에 해당되는 400 nm와 700 nm 부근에서 급격하게 저하되므로 400 nm 이하와 700 nm 이상의 광이 광합성에 미치는 영향은 상대적으로 작음을 알 수 있다. 식물에 들어 있는 광합성색소, 즉 엽록소 a, 엽록소 b, 카로티

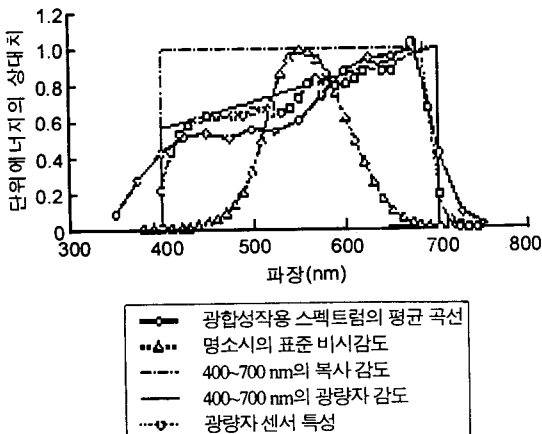


그림. 3 광합성 작용 스펙트럼, 표준 비시감도, 복사 및 광량자 감도.

노이드에 의한 광의 흡수 파장영역은 광합성 유효복사의 파장 영역과 일치한다.

지상에서의 태양복사, 즉 일사 가운데 포함된 광합성 유효복사의 비율은 약 45%이다. 한편 식물의 광형태 형성에는 광합성 유효복사 이외의 파장 영역을 갖는 광도 관계가 있다. 이 가운데 300~800 nm의 광은 식물의 생리 반응에 관계가 되므로 생리적 유효복사로도 불리운다.

5. 단파복사와 일사

가. 단파복사와 장파복사

물체로부터 방출된 복사의 파장 영역은 그 물체의 온도에 의존한다. 복사에너지가 최대로 되는 파장 λ<sub>max</sub> (μm)는 Wien의 법칙으로 불리우는 다음 식에서 계산된다.

$$\lambda_{max} = 2897/T \dots\dots\dots (1)$$

여기에서 T: 물체의 절대온도(K)이다. (1)식으로부터 알 수 있는 바와 같이 물체로부터 방출된 복사의 최대파장은 물체의 절대온도에 반비례하므로, 물체의 온도가 높을 수록 파장은 짧게 된다.

태양의 표면온도는 약 6,000 K이므로, λ<sub>max</sub> = 2897/6000 ≃ 0.5 μm 이다. 지상의 상온 물체는 약 300 K를 나타내므로, λ<sub>max</sub> = 2897/300 ≃ 10 μm 이다. 즉 그림 4와 같이 태양복사의 경우 0.5 μm에서 최대에너지를 나타내며, 에너지를 방출하는 파장영역은 0.3~3 μm 이다. 한편, 지상에 있는 물체로부터의 복사는 10 μm에서 에너지의 최대치가 나타나며, 파장영역은 3~100 μm 이다. 태양과 지상의 물체로부터의 복사는 그림 4와 같이 파장 영역이 구분되므로, 상대적으로 파장이 짧은 태양복사를 단파복사, 파장이 긴 지상 물체로부터의 복사를 장파복사라 부른다. 보통 장파복사는 복사냉각과 밀접한 관계를 갖고 있다.

물체표면으로부터 방출된 단위면적·단위시간당 복사에너지는 그 물체온도의 4승에 비례하므로, 단

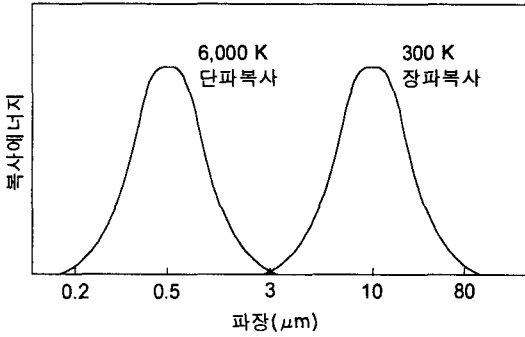


그림. 4 단파복사 및 장파복사.

위면적 · 단위시간당 태양표면으로부터 방출된 복사 에너지는 지표로부터 방출된 것의 16만배에 이른다.

나. 일 사

지표면에 입사되는 태양복사 또는 태양광을 일사(solar radiation)라 부른다. 일사의 파장 범위는 약 0.3~3 μm 로서, 단파복사의 파장과 일치한다. 그림 5와 같이 태양복사가 대기권을 통과하는 동안 대기 중의 수증기, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> 등에 의해서 일부 파장이 선택적으로 흡수되므로 대기권 외부와 지표면에서의 분광에너지 분포는 다르게 된다.

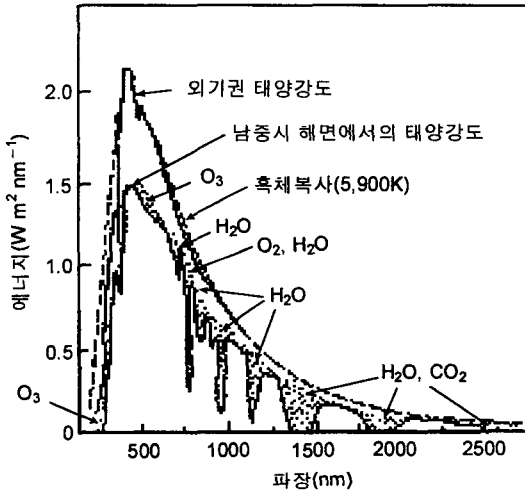


그림. 5 태양복사의 분광 분포.

파장 280 nm 이하의 UV-C는 대기중의 오존에 의해서 흡수되어 지상에는 도달하지 않는다. 그러므로 일사에 포함되는 자외선은 파장이 280 nm 이상인 근자외선, UV-A 또는 UV-B이다. 이 가운데 UV-A가 대부분을 차지하며, UV-B가 차지하는 비율은 약 3~4% 정도이다. 일사에 포함된 적외선은 파장이 최대 3 μm에 이르며, 근적외선, IR-A 또는 IR-B가 이에 해당된다. 유리에 대한 투과성이 양호한 광의 파장은 3~4 μm으로서, 일사의 상한 파장과 거의 일치한다. 일사에 포함된 가시광 및 적외선 에너지의 비율은 각각 50%에 이르며, 자외선 비율은 數%에 불과하다.

6. 피조사면 또는 통과면에서 광강도를 표시하는 용어

가. 복사조도와 복사선속밀도

복사조도(irradiance)는 광의 입사면과 관련된 용어로서, 광의 반사면과 관련해서는 이 용어가 사용되지 않는다. 복사선속밀도는 복사가 임의의 한 방향으로부터 다른 방향으로 이루어질 때 사용되는 용어로서, 광의 입사면에서의 복사선속밀도를 복사조도라 부른다. 한편, 광량자에 대해서는 입사면과 통과면 모두에서 광량자속밀도로 사용된다. 복사조도는 단위시간 · 단위면적당 입사된 에너지로서, 기본 단위는  $W m^{-2}(=J m^{-2} s^{-1})$ 이다. 종래에는  $kcal m^{-2} h^{-1}$ ,  $cal cm^{-2} min^{-1}$ ,  $Ly min^{-1}$  등의 단위가 사용되었으나, kcal, cal, Ly가 SI단위계에 해당되지 않으므로 점차 사용되지 않고 있다. 한편, 상기 단위의 환산관계는 다음과 같다. 즉  $1 W m^{-2} = 0.86 kcal m^{-2} h^{-1}$ ,  $600 kcal m^{-2} h^{-1} = 1 cal cm^{-2} min^{-1} (= 1 Ly min^{-1})$ 이다. 일사량은 복사선속밀도에 해당되므로 복사조도와 동일한 단위를 갖는다. 단, 적산일사량을 표시할 때에는  $J m^{-2}$ 의 단위가 사용된다.

보통 복사선속밀도라 하면 단파복사와 장파복사가 모두 포함되므로 대상이 되는 파장 영역이 단파복사인 경우 단파복사선속밀도라 부르면 파장 범위가 보다 명확해진다. 복사조도, 복사선속밀도, 일사

량 등은 사용되는 단위로부터 알 수 있듯이 온실 또는 재배시설내의 열수지 또는 공기조화 등 에너지 흐름을 표시할 때 사용하는 것이 적절하며, 식물의 광합성 등을 표시할 때는 광합성 유효광량자속밀도를 사용하는 것이 적합하다.

나. 광합성 유효 광량자속밀도

광량자속밀도는 단위시간 · 단위면적당 입사된 광량자수를 의미한다. 이 가운데 파장 영역이 광합성 유효복사(400~700 nm)에 한정된 광량자속밀도를 광합성 유효 광량자속밀도라 부른다. 광량자속밀도의 단위로서  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  또는  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 가 사용된다. 광량자 1 mol은 아보가드로數에 상당하는  $6.022 \times 10^{23}$ 개의 광량자를 의미한다. 종전에는 mol 대신에 E(Einstein)이 사용되었으나, 현재는 거의 사용되지 않는다.

광합성 유효 광량자속밀도(Photosynthetic Photon Flux Density)는 영문의 머릿글자를 따서 PPF로 축약하여 사용되는 경우가 많다. 동일한 정의로서 광합성 유효 광량자속(PPF)이 사용되기도 하나, 이것은 표 1에서 보는 바와 같이 단위시간당 광합성 유효 광량자수를 의미한다. 그러므로 束密度임을 명확하게 나타내려면 광합성 유효 광량자속밀도로 표현하는 것이 적합하다. 한편, 미국의 원예학 또는 작물학 분야에서는 PPF에 비해서 PPF의 사용을 권장하고 있다.

광합성 유효 광량자속밀도를 축약하여 간단히 광량자속밀도라 부르나 광량자속밀도에는 광합성 유효복사 이외의 파장 영역도 포함되어 있다. 그러므

로 광합성 유효복사의 파장 영역에 대한 오해가 초래되지 않도록 광합성 유효 광량자속밀도 혹은 광량자속밀도(400~700 nm)와 같이 명확하게 표시하는 것이 바람직하다.

그림 6은 복사조도, 광합성 유효 광량자속밀도 및 조도의 정의에 기초하여 각 파장에서 단위에너지당 각각의 물리량 {예를 들면 광합성 유효 광량자속밀도의 경우 복사에너지 1 J당의 광량자수(mol)}의 상대치를 나타낸 것이다. 그림 6(A)의 복사속밀도는 정의로부터 단위에너지당 에너지 감도가 모든 파장에서 동일하게 1의 값을 갖는다. 광합성 유효 광량자속밀도와 관련하여 단위에너지당 광량자수는 파장에 따라 다르며, 그 상대치는 그림 6(B)와 같다. 광량자 1개가 지니고 있는 에너지는 다음 식으로 표시된다.

$$e = h v = h c / \lambda \dots\dots\dots (2)$$

여기서 e: 광량자 에너지 (J), h: 플랑크 상수(=  $6.625 \times 10^{-34}$  J s), v: 진동수( $\text{s}^{-1}$ ), c: 광속(=  $2.998 \times 10^8$  m  $\text{s}^{-1}$ ),  $\lambda$ : 파장 (m) 이다. 식(2)로부터 알 수 있는 바와 같이 광량자 1개의 에너지는 파장에 반비례하며, 파장이 짧을수록 크게 된다. 파장 400 nm에서 광량자 1개의 에너지는 파장 700 nm에서 광량자 1개의 에너지의 700/400 배가 된다. 역으로 단위에너지당 광량자수는 파장이 짧을수록 작게 되어 400 nm의 광량자수는 700 nm의 그것에 400/700 배가 된다. 즉, 단위에너지당 광량자수의 파장별 상대치는 그림 6(b)와 같게 된다. 표 2는 상기 식으로부터 결정된 광에너지 1 J당 광량자수 및 광량자 1 mol 당 에너지를 파장별로 나타낸 것이다.

표 1 광방사의 용어 및 단위의 상호 관계

束 (flux)	束密度 (flux density)
복사선속 [W]	복사선속밀도(복사조도) [W m <sup>-2</sup> ]
광량자속 [ $\mu\text{mol s}^{-1}$ ]	광량자속밀도 [ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]
광속 [lm]	조도 [lx = lm m <sup>-2</sup> ]

다. 조 도

1) 표준 비시감도

인간의 눈은 파장에 따라 밝기를 감지하는 능력이 다르다. 이 가운데 파장 555 nm 부근의 황녹색광을 가장 밝게 감지하며, 가시광의 양단에 위치한 파장으로 이동할수록 감도는 저하된다. 시감도는 단위

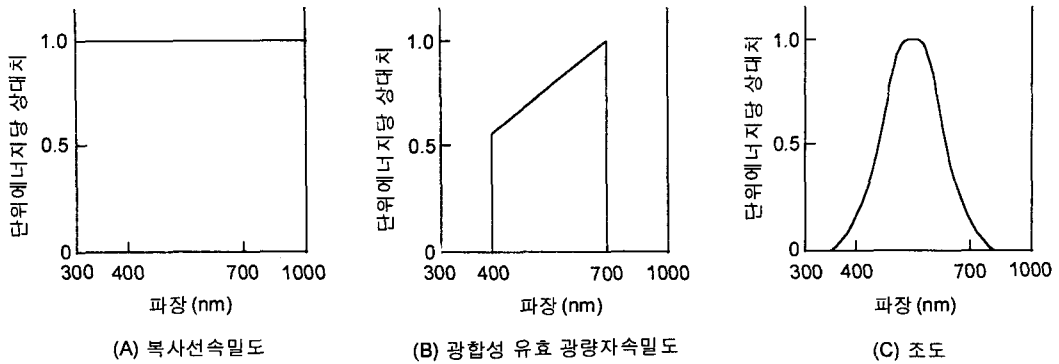


그림. 6 각 파장에서 단위에너지당 감도의 상대치.

표 2 파장별 에너지와 광량자의 환산계수 및 환산식

파장 (nm)	1 J당 광량자 [mol]( $\times 10^{-6}$ )*	광량자 1 mol당 J( $\times 10^{-5}$ )**
200	168	5.98
250	209	4.78
300	251	3.99
350	392	3.42
400	334	2.99
450	375	2.66
500	419	2.39
550	460	2.17
600	502	1.99
650	543	1.84
700	585	1.71
750	626	1.60
800	671	1.50
850	709	1.41
900	758	1.33
950	794	1.26
1,000	834	1.20
1,050	877	1.14
1,100	917	1.09
1,150	962	1.04

\*  $\text{mol J}^{-1} \approx 8.34 \times \lambda \text{ [nm]} \times 10^{-9}$ .

\*\*  $\text{J mol}^{-1} \approx 1.20 \times \lambda \text{ [nm]} \times 10^8$ .

에너지에 대해서 인간의 눈으로서 감지되는 밝기의 정도를 나타내며, 단위로서  $\text{lm W}^{-1}$ 이 사용된다. 파장 555 nm인 광의 시감도에 대한 파장 380 nm와 760 nm인 광의 시감도는 약 1/20,000에 불과하다.

시감도의 최대치는 1로서 각 파장별 시감도의 상대치를 비시감도라 부른다. 비시감도는 그림 7과 같이 눈이 보통의 밝기에 순응하는 밝은 빛 시감(明所視, photopic vision)과 어두움에 순응하는 어두운 빛 시감(暗所視, scotopic vision)에 따라 다소 차이가 있다. 밝은 빛 시감에서 비시감도의 최고치는 파장 555 nm에서 나타나나, 어두운 빛 시감에서는 밝은 빛 시감에 비해서 다소 단파장에 가까운 파장 507 nm에서 최고치를 갖는다. 명소시에서 다수 인간의 표준적 비시감도를 표준비시감도라 한다.

조도는 단위면적·단위시간당 입사된 복사에너지(혹은 복사속밀도)를 표준비시감도에 기초하여 평가

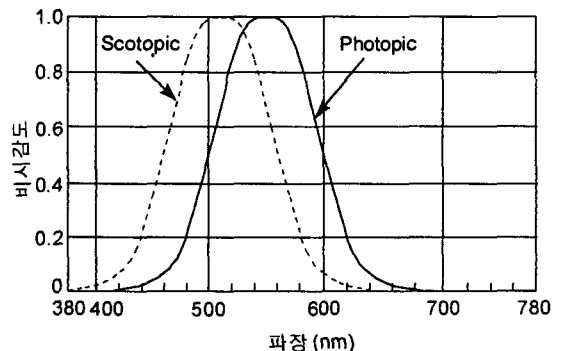


그림. 7 표준 비시감도 곡선.

한 것으로서 시감도를 표시하는 지표에 해당되며, lx의 단위를 갖는다.

2) 조도와 복사조도의 관계

단위에너지(IJ)당 조도의 파장별 감도의 상대치는 그림 6(C)와 같이 표준비시감도 곡선과 동일한 형태를 갖는다. 파장 555 nm에서  $1W m^{-2}$ 의 광은 약 6,831 lx에 해당된다. 조도에서는 파장 555 nm로부터 멀리 떨어질수록 에너지당 감도가 크거나 작게 된다. 또한 그림 3에 표시한 광합성 작용 스펙트럼을 함께 고려하면 이해되는 바와 같이 식물생육과 관련된 광의 지표로서 조도를 사용하는 것은 적합하지 않다. 광 - 광합성곡선 또는 광합성의 광포화점을 표시할 때 조도가 사용된 경우가 많이 있으나, 이것은 종래에 광을 측정할 때 조도계 이외에 다른 센서가 개발되어 있지 않음에 기인한 결과이다. 현재에는 조도 대신에 광합성 유효 광량자속밀도, 즉 PPFD가 널리 사용되고 있다.

3) 광도, 광속 및 조도의 관계

단순하게 밝기를 언급할 지라도 임의의 면에서의 밝기와 광원의 밝기에는 차이가 있다. 전자의 밝기를 조도라 하며, 후자의 밝기를 광도라 한다. 한편, 광원으로부터 방출되는 광을 양적으로 표시한 것이 光束이다. 각종 램프에 대한 기술자료를 살펴볼 때 이에 대한 이해가 필요하다.

그림 8은 광도, 조도 및 광속의 관계를 나타낸 것이다. 이 3가지는 모두 인간의 눈에 대한 광의 파장별 감도를 고려한 것이다. 광도의 단위는 cd(candela)로서, 주파수  $540 \times 10^{12}$  Hz(파장 555 nm)의 단색복사를 방출하는 광원의 복사강도가  $1/683 W sr^{-1}$ 인 방향에서 광도를 1 cd로 정의한다. 과거에 사용되던 1축광은 약 1 cd에 상당한다.

구의 중심에 광도 1 cd의 광원이 위치하고, 모든 방향으로 균일하게 광복사가 이루어질 때 이 광원으로부터 1 sr(steradian)의 입체각을 통과하는 광속을 1 l(lumen)이라 한다. 여기에서 sr이라는 것은 구의 중심으로부터 구 반경의 2승과 동일한 구면상의 표면적을 바라 본 입체각을 의미한다. 구의 중심으로부터

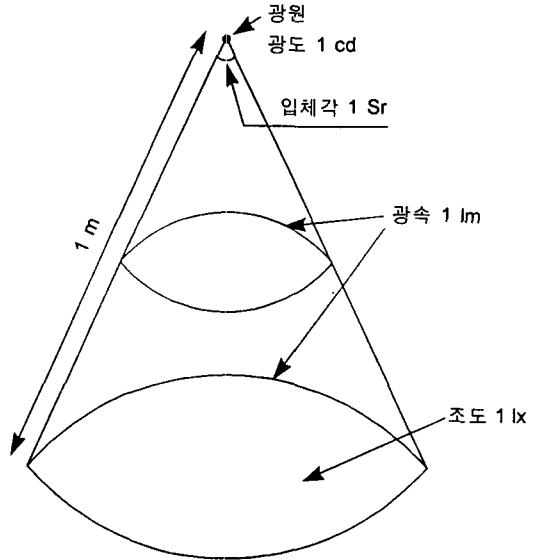


그림. 8 광도, 광속 및 조도의 관계.

터 구 표면 전체를 본 입체각은  $4\pi$  (구의 표면적  $\div$  (반구의 제곱)  $= 4\pi r^2 \div r^2$ )에 해당된다. 한편 광속을 면적으로 나눈 것이 조도이다. 따라서 표 3에서 보는 바와 같이 조도는 복사속밀도 또는 광량자속밀도에 대응하는 명칭이다. 반구 1 m인 구의 중심에 1 cd의 점광원이 위치한 경우 1 sr인 구면상의 표면적은  $1 m^2$ 이고, 이 면적을 통과하는 광속은 1 lm에 해당되며, 이 면에서의 조도는 1 lx이다. 광의 흡수를 무시하고 구의 중심에 점광원이 위치한 경우 구의 표면적은 반경의 제곱에 해당되므로 광원으로부터의 거리가 2배에 이르면 조도는 1/4로 감소한다. 이 상으로부터 광도 cd, 광속 lm, 조도 lx의 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다. 즉,  $1 lm = cd sr$ ,  $1 lx = 1 lm m^{-2} = 1 cd sr m^{-2}$ 이다.

라. 복사조도, 광합성 유효 광량자속밀도 및 조도의 관계

광질이 동일한 경우, 즉 임의의 파장이 갖는 에너지가 동일한 비율로서 증가하거나 감소하는 광원에 있어서 복사조도 : 광합성 유효 광량자속밀도 : 조도의 비율은 일정하다. 그러므로 이러한 비율을 사전



표 3 광합성 유효 광량자속밀도, 복사조도 및 조도의 환산계수

광 원	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} / \text{W m}^{-2}$	$\text{lx} / \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
	400~700 nm	400~700 nm	400~850 nm
태양 및 주광	4.57	54	36
청색 하늘	4.24	52	41
고압나트륨램프	4.98	82	54
메탈할라이드램프	4.59	71	61
수은 램프	4.52	84	77
온백색형광램프	4.67	76	74
백색형광램프	4.59	74	72
식물육성용 형광램프 A	4.80	33	31
식물육성용 형광램프 B	4.69	54	47
백열전구	5.00	50	20
저압나트륨램프	4.92	106	89

에 결정해 두면 위의 3가지 가운데 어느 1가지의 측정치가 주어질 때 환산관계에 의해서 나머지 2가지를 결정할 수 있다. 예를 들면 일사량을 측정 한 후 환산식을 적용하면 일사의 광합성 유효 광량자속밀도와 조도를 결정할 수 있다. 단 청명일에 비해서 구름이 많은 날 또는 朝夕에는 장파장측의 에너지 비율이 높으므로 일사에 대한 복사조도 : 광합성유효 광량자속밀도 : 조도의 비율이 일정하지 않으므로 이에 유의하여야 한다. 또한 인공광원의 종류에 따라 광질과 환산계수가 달라진다. 표 3은 여러 종류의 광원에 대한 환산계수를 표시한 것이다. 동일한 종류의 인공광원에서도 제조업체 또는 형식에 따라 환산계수가 다름에 주의할 필요가 있다.

### 7. 분광에너지 분포

단위파장당 복사에너지, 복사선속 또는 복사선속 밀도 등을 파장에 따라 연속적으로 표시한 것을 분광에너지 분포라 부른다. 이것을 도시할 때는 그림 5와 같이 횡축에 파장을, 종축에 단위파장당 복사선속 밀도 등을 표시한다. 분광이라는 것은 광을 파장에 따라 분해하는 것을 의미한다. 한편, 분광이라는 용어 대신에 파장별이라는 용어가 사용되어 파장별

에너지 분포라고 일컫는 경우도 있다. 그러므로 종축에 표시되는 대상에 따라 다양한 분광분포의 표시가 가능하다. 예를 들면, 종축에 광량자속밀도를 표시할 경우 이 도표는 분광광량자속밀도 분포를 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 에너지와 광량자 사이에는 (2)식과 같은 관계가 있으므로 분광에너지 분포가 알려져 있다면 분광광량자속밀도 분포를 유도할 수 있으며, 반대로 역의 관계도 성립한다.

이 밖에 종축에 광투과율, 흡수율 또는 반사율을 설정하면 각각 분광투과율, 분광흡수율 또는 분광반사율을 나타낸다. 스펙트럼이라는 용어가 사용되기도 하는 데, 이것은 파장 차이에 의해서 분해된 성분을 파장의 크기별로 표시한 것으로서 분광분포와 동일한 의미를 지닌다.

### 8. 색온도와 연색성

#### 가. 색온도

백열전구, 형광램프 등 일상 생활에서 접하는 각종 광원의 빛, 또는 낮에 보는 태양광의 색조는 각각 달리 보일 수 있다. 임의의 광원이 방출하는 빛의 색조를 물리적인 척도로 나타낸 것이 색온도(colour

temperature)로서, 이것은 조명되는 장소의 분위기를 결정하는 요소가 된다. 어떤 광원의 색온도는 광원의 색좌표가 흑체의 색좌표와 동일할 때 흑체의 온도로서 정의되며, 단위로서 K가 사용된다. 일반적인 광원들은 완전복사체로부터 다소 벗어난 복사 분포를 갖기 때문에 광원의 색좌표는 완전복사체의 색좌표와 동일하지 않게 된다. 이 경우 광원의 색온도는 완전복사체의 색좌표에 가장 근접한 거리에 있는 색온도에 해당되는 데 이 값을 상관색온도(correlated colour temperature)라 부른다. 일반적으로 색온도가 낮으면 황색에 가까우면서 따뜻한 기운이 있는 빛으로 되고, 색온도가 높아짐에 따라 낮의 태양광처럼 백색을 띄게 된다. 색온도가 더욱 높아지면 청색에 가까운 시원한 빛을 나타낸다. 청명한 하늘의 상관색온도는 약 6,000 K이며, 형광램프 및 백열등의 상관색온도는 각각 10,000 K와 3,000 K 정도이다.

#### 나. 연색성

연색성이란 색의 3요소, 즉 물체(색편), 광원, 눈 중 광원의 특성에 의한 것으로 동일한 색시료가 광원의 특성에 따라 다르게 보이는 현상을 의미하는 것으로서, 이것은 물체의 색이 자연광하에서 본 경우와 어느 정도 유사한가를 수량으로 나타낸 용어이다. 연색성의 평가 단위로서 사용되는 연색지수(rendering index)는 미리 정해진 8색의 Munsell 시험색(7.5R6/4, 5Y6/4, 5GY6/8, 2.5G6/6, 10BG6/4, 5PB6/8, 2.5P6/8, 10P6/8)을 측정하려고 하는 광원하에서 본 경우와 기준광원에 해당되는 표준광원 D 또는 완전복사체광원(Planckian source) 하에서 본 경우의 차이로 측정하며, 단위로서 Ra가 사용된다. 이 때 주의할 사항은 평가하고 싶은 광원과 동일한 색온도의 기준광이 사용되어야 한다는 것이다. 측정된 광원이 기준광원과 동일하면 연색지수는 Ra 100으로 나타내고, 색 차이가 크게 날수록 Ra 값이 작아진다.

### 9. 결 론

광은 생명체의 존속을 가능케 하는 에너지원으로서 인간의 삶에도 커다란 영향을 미치는 환경 요소

이다. 이제까지 식물의 생장은 자연광에 거의 전적으로 의존하였으나, 다양한 광질을 지니면서 조명효율이 우수한 인공광원의 등장으로 인하여 인공광의 적용 범위가 점차 확대되고 있다. 즉 광 고유의 단순 조명 기능에 국한되지 않고 자연광과 인공광의 병용 또는 인공광만을 이용한 식물공장, 조직배양 과정에서의 광강도 및 광질 제어, 온실내에서의 전조재배 또는 보광재배, 양계 및 축산 시설내에서 인공광을 이용한 생산 기능 조절 및 위생, 수산업에서 集魚燈의 사용, 광복사에 의한 해충 방제, 식품의 비파괴 성분 분석에 근적외광의 이용, 농산물의 외관 색상 결정 등에 이르기까지 광범위하게 인공광이 사용되면서 광응용에 의한 생물산업(bio-industry)의 발전이 기대되고 있다. 이에 따라 본고에서는 광 또는 복사와 관련된 용어 정립의 필요성을 느끼면서 식물생장과 관련된 광의 물리학적 용어 및 개념을 정리하였다. 광의 응용 목적에 적합한 용어와 단위의 사용이 이루어지기를 기대한다.

### 참 고 문 헌

1. 김용현. 1997. 인공광을 이용한 식물의 생장 및 광형태형성 제어. 한국식물공장연구회 발표 자료.
2. 광측정과 복사 측정. 1988. 한국표준연구소 보고서 KSRI-88-43-ET.
3. 색의 측정 및 표시방법. 1982. 한국표준연구소 보고서 KSRI-MO-21.
4. 日本生物環境調節學會編. 1995. 生物環境調節ハンドブック. 養賢堂.
5. 日本植物工場學會編. 1994. 植物生産における人工照明技術の基礎と應用. SHITA Report No. 8.
6. 日本照明學會. 1992. 光バイオインダストリー. オーム社.
7. 日本農業氣象學會. 1986. 農業氣象用語解説集.
8. CIE. 1987. International lighting vocabulary. CIE Pub. No. 17(4).
9. Hunt, R. W. G. 1987. Measuring colour. Ellis Horwood Limited Publishers, Chichester, England.
10. Mohsenin, N. N. 1984. Electromagnetic radiation properties of foods and agricultural products. Gordon and Breach Science Publishers.