

광합성 계측과 계측환경제어

Environment Control for Photosynthesis Measurement

李泮雨 · 崔日鮮

서울대학교 농업생명과학대학

Lee, Byun Woo · Cui, Ri Xian

College of Agriculture & Life Science, Seoul Nat'l Univ.

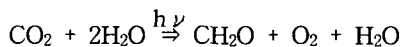
서 언

식물이 성장하고 발육하며 자신의 생명을 유지해 나가기 위해서는 끊임없이 에너지를 공급받아야 하는데, 이 에너지의 공급원은 태양으로부터 오는 光에너지이다. 이러한 光에너지는 엽록소(chlorophyll)를 함유한 녹색식물의 잎이나 줄기 등에서 氣孔(stomata)을 통하여 흡수되는 이산화탄소(CO₂)와 뿌리에서 주로 흡수되는 물(H₂O)로부터 糖類 · 澱粉과 같은 炭水化合物을 합성하고 산소를 방출하는데 이러한 光에너지가 화학에너지로 변환되는 과정을 광합성(photosynthesis) 또는 炭素同化作用(carbon assimilation)이라고 한다. 광합성에 의해 화학에너지로 고정된 光에너지는 식물의 성장발육에 이용되거나 전분, 당류 및 지질의 형태로 식물체에 저장되며 저장된 에너지는 종자 발아시에 사용된다. 이러한 저장 에너지는 식물의 성장뿐만 아니라 식물의 종자 및 가타 부분을 섭취하는 인간을 포함한 지구상의 비광합성 생물의 주요 에너지원의 역할을 한다.

식물의 광합성은 이산화탄소(CO₂)를 흡수하고 산소(O₂)를 방출하는 과정으로서 식물의 광합성 측정에 있어서도 이러한 광합성작용의 본질에 기초하여 광합성과정중 이산화탄소(CO₂)의 흡수속도를 측정하는 방법과 산소(O₂)의 방출속도를 측정하는 방법에 의한 광합성 속도의 측정방법이 주로 이용되고 있으며 이외에도 ¹⁴CO₂의 흡수량에 의한 광합성속도 측정방법과 경지에서 균락상의 CO₂ 농도구배에 의한 미기상학적 측정방법도 사용되고 있지만 이러한 방법도 엄격히 말하면 역시 CO₂의 흡수량에 의해 광합성속도를 계산하는 것이라 할 수 있다. 여기서는 대기와 식물체의 CO₂ 교환속도를 계측하여 광합성속도를 측정하는 방법의 이론적 배경, 측정기의 구성 및 계측환경조절 등에 대하여 기술하였다.

1. 식물의 광합성과 환경

식물의 광합성이란 태양의 光에너지를 화학에너지로 변환하는 과정으로서 다음의 식으로 나타낼 수 있다.



위의 반응식에서 볼 수 있듯이 광합성은 이산화탄소를 광에너지를 이용하여 환원하는 과정이다. 지구상의 식물은 태양으로부터 빛에너지를 흡수하고 수분은 주로 식물체의 뿌리를 통하여 토양으로부터 흡수하며 열려있는 잎의 기공(stomata)을 통하여 대기중의 이산화탄소(CO₂)를 흡수한다.

식물의 광합성은 대략 다음의 세 과정을 거쳐 이루어진다.

1) 이산화탄소(CO₂)의 엽록체(chloroplast)로의 확산 : 공기중의 이산화탄소(CO₂)는 대류와 확산에 의해 기공을 거쳐 엽육세포막을 지나 엽록체에 이르게 된다.

2) 광화학반응(photochemical reaction) : 광화학반응은 색소에 의한 빛에너지의 흡수과정과 흡수된 빛에너지가 화학에너지로 변화되는 과정으로 나눌 수 있다. 이러한 과정은 빛이 있어야만 되기 때문에 명반응(light reaction)이라고도 한다. 명반응에서 생성된 NADPH₂와 ATP는 암반응의 이산화탄소의 고정에 에너지원으로 이용된다.

3) 이산화탄소 고정반응계 : 이산화탄소 고정반응이란 CO₂와 H₂O가 결합하여 포도당을 생성하는 과정인데, 이 반응은 빛을 필요로 하지 않기 때문에 암반응이라고도 한다. 그러나 이 반응과정에서는 명반응에서 생성된 ATP와 NADPH₂가 필요하다.

광합성은 대기와 식물체간의 CO₂교환속도로 나타낼 수 있는데 CO₂교환속도는 대기와 엽록체사이의 CO₂농도차와 CO₂확산경로중의 저항에 의하여 결정된다. 대기로부터 葉内の 엽록체로의 CO₂ 확산과정에서 葉面境界層抵抗, 氣孔抵抗, 葉肉抵抗, 탄산고정저항 및 광화학반응저항 등 여러 가지 확산저항이 있는데, 이러한 저항의 차이에 따라 식물의 광합성속도가 변화되게 된다. CO₂의 확산량은 大氣와 葉内の CO₂농도차이에 비례하며 總擴散抵抗値에 반비례한다. CO₂의 대기로부터 엽록체로의 흐름을 전류의 흐름과 같이 가정하고 대기와 엽록체의 CO₂의 농도차이를 전위차로 가정하여 대기와 엽록체사이의 여러 가지 저항을 다음과 같은 회로도(그림1)로 나타낼 수 있다.

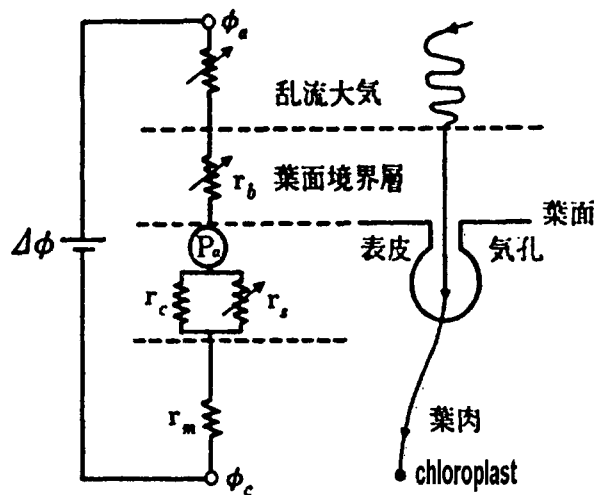


그림1. CO₂ 확산경로와 확산저항(矢吹, 1969)

대기로부터 엽록체로의 CO₂ 확산량(P₀) 즉, 광합성은 대기와 엽록체내의 CO₂농도 및 총 확산저항(Σr)에 의하여 다음 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$P_0 = \frac{\phi_a - \phi_c}{\Sigma r} = \frac{\phi_a - \phi_c}{(r_a + r_b + r_m + \frac{r_s \cdot r_c}{r_s + r_c})} \dots\dots\dots (1)$$

그림 1 및 식(1)에서 ϕ_a, ϕ_c는 大氣와 엽록체내의 CO₂ 농도이며, r_a는 亂流大氣抵抗

(turbulent atmospheric resistance), r_b 는 葉面境界層抵抗(leaf boundary layer resistance), r_c 는 表皮抵抗(cuticular resistance)이고 r_s 는 氣孔抵抗(stomata resistance)이며 r_m 은 葉肉抵抗(mesophyll resistance)이다. P_0 는 엽록체로의 CO_2 확산량이므로 순광합성속도(net photosynthesis rate)에 해당된다.

亂流大氣抵抗(r_a)은 일반적으로 10^{-1}sec/cm 이하로서 다른 저항에 비해 작기 때문에 總擴散抵抗의 계산에서 무시한다.

바람과 葉面의 마찰에 의하여 粘性이 생겨서 풍속이 약해지며 풍속이 약해진 이 층에서는 亂流大氣에 비해 확산계수가 낮는데, 이러한 층의 CO_2 확산저항을 葉面境界層抵抗(r_b)이라고 한다. r_b 는 다음 식으로 나타낼 수 있는데,

$$r_b \cong \frac{\delta_0}{D_0} \propto \sqrt{\frac{D}{u}}, \text{ 식에서 } D \text{는 代表長(characteristic dimension)으로 잎의 모양과 크기}$$

에 따라서 결정되며, u 는 풍속이다. δ_0 은 경계층 두께인데, 風速에 반비례하고, 바람의 방향, 바람이 잎의 선단으로부터 불어간 거리등에 따라 달라진다. D_0 는 CO_2 의 分子확산계수로서 $25^\circ C$ 에서 $0.151 \text{cm}^2/\text{sec}$ 의 값을 가진다. 다음 그림2는 풍속과 代表長에 따른 기공확산 저항의 변화이다(矢吹, 1985)

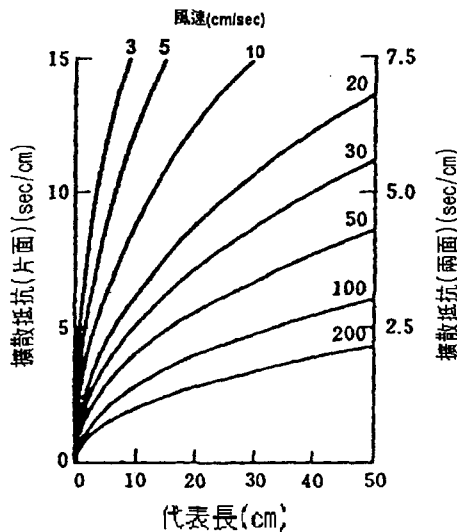


그림 2. 葉面境界층저항과 풍속 및 葉장(代表長)과의 관계(矢吹, 1985)

氣孔抵抗(r_s)은 기공의 크기, 기공의 數, 그리고 기공의 개폐정도에 따라 크게 변화된다. 기공이 열렸을 때의 기공저항은 $1 \sim 6 \text{sec/cm}$ 이며 暗상태에서 氣孔이 닫혔을 때의 확산저항은 약 $35 \sim 40 \text{sec/cm}$ 정도이다. 기공저항은 光強度, 풍속 등 환경요인의 변화에 따라 변하는데, 强光하에서는 약 3sec/cm 정도로 낮다. 기공저항에 영향 주는 환경요인들은 다음과 같다.

光 : 光強度가 낮을 때에는 기공저항이 크고 光強度가 높아짐에 따라 기공저항은 작아진다(그림 3).

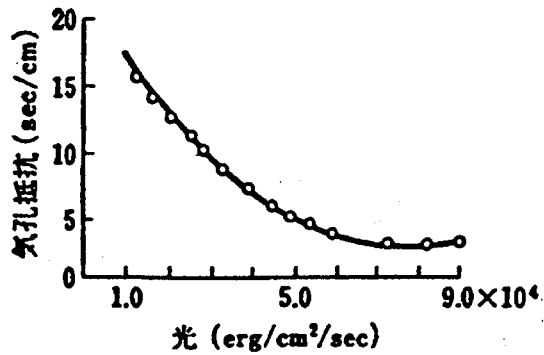


그림 3. 광강도에 따른 기공저항의 변화(Rijtema, 1965)

습도 및 온도 : 대기습도가 높아짐에 따라 기공저항은 작아지며, 식물의 광합성작용의 적은범위에서 온도가 높아짐에 따라 기공저항은 작아진다. 그림 4는 온도와 대기습도의 변화에 따른 氣孔開度の 변화를 나타낸 것이다.

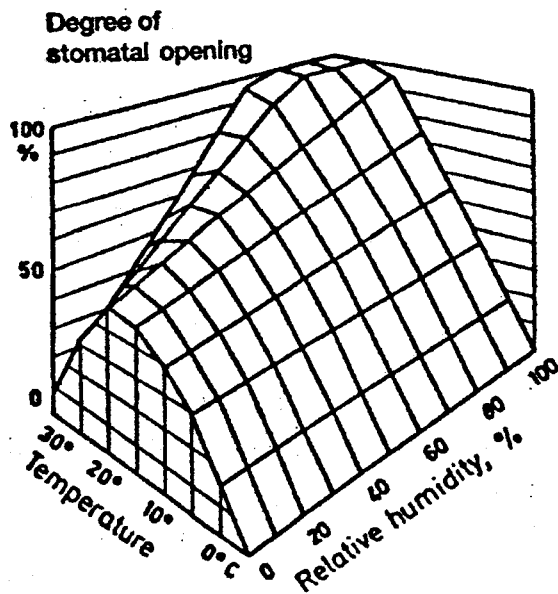


그림 4. 대기 온도와 상대습도에 따른 氣孔開度の 변화(Larcher, 1995)

CO₂농도 : CO₂농도가 높아짐에 따라 氣孔의 개도가 작아져서 氣孔抵抗은 커지는데 그 정도는 C₄작물이 C₃작물보다 크다.

풍속 : 기공저항에 대한 풍속의 영향은 光強度에 따라 다른데, 光強度가 낮을 때에는 증

산량(일반적인 경우, 기공저항이 작을 때 증산량이 많음)은 풍속에 비례하여 증가하지만 光強度가 높을 때에는 풍속이 어느 한계를 초과하게 되면 증산량은 오히려 작아진다(그림 5).

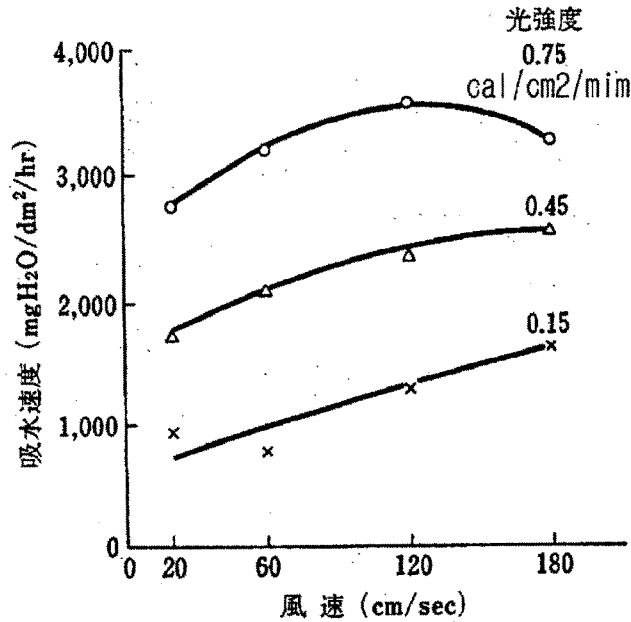


그림 5. 풍속과 증산량과의 관계(矢吹, 1985)

다음 표 1은 외부요인의 변화에 따른 기공개폐의 반응을 종합한 것이다.

표 1. 외부 요인의 변화가 기공개폐에 미치는 영향(Larcher, 1995)

External factor	Alteration	Response(increase in stomatal aperture)
PhAR	Increase	Up to light saturation of photosynthesis
Temperature	Toward optimal temperature for photosynthesis	Between 15 and 35°C
Air humidity	Increase	Above 90% RH
CO ₂	Decrease in partial pressure	Below 30 Pa
Atmospheric pollution	Decrease	Only at lowest concentration

表皮抵抗(r_c)은 식물종류, 생육단계, 표피의 두께, 구조 및 환경조건에 따라 다른데, 陰生 식물은 약 20sec/cm 이하이고, 일반 채소종류는 약 20~80sec/cm 라고 한다.

氣孔을 통과한 CO₂는 엽록체까지 확산되는 과정에서 細胞間극, 세포막저항, rubisco 활성 및 광화학계의 활성 등에 의해 확산저항이 달라지는데, 이러한 확산저항을 葉肉抵抗(r_m)이라고 한다. 엽육저항은 작물에 따라서 약 1~7sec/cm 범위라고 한다(Jarvis 등, 1966).

亂流大氣抵抗(r_a)은 다른 저항에 비해 작으므로 무시하고, 表皮抵抗(r_c)은 병렬관계에 있는 氣孔抵抗(r_s)보다 매우 크기 때문에 무시하면 순광합성속도(CO_2 확산량)를 나타내는 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_0 = \frac{\psi_a - \psi_c}{r_b + r_s + r_m} \dots\dots\dots (2)$$

2. 광합성의 계측

식물의 광합성속도 측정방법은 이산화탄소(CO_2)의 흡수속도를 측정하는 방법, 산소(O_2)의 방출속도를 측정하는 방법 및 식물의 건물생산이나 탄수화물 생산속도를 측정하는 방법 등 세 가지 방법이 많이 이용되고 있으며, 그 중에서도 적외선 CO_2 가스 분석법에 의한 CO_2 의 흡수속도를 측정하는 방법이 제일 많이 이용되고 있다. 따라서 여기서는 적외선 CO_2 가스 분석법에 관해 기술하고자 한다.

1) 적외선 가스 분석법

적외선 가스 측정법은 개방식, 폐쇄식 및 동적 측정법으로 구분되며 어느 것이나 투명 아크릴 판으로 제작된 동화상자를 사용하며, 동화상자내의 CO_2 수지식 즉, 순광합성속도 (A'_n)의 측정은 다음 식 (3)과 같다.

$$A_n = (u_e c_e - u_o c_o) - VdC/\Delta t + B \dots\dots\dots (3)$$

식 (3)에서 V 는 동화상자의 체적이고(단위 : mole of air), dC 는 일정시간내 동화상자내의 CO_2 농도의 변화이고, B 는 CO_2 의 유입속도이다. u_e, u_o 는 동화상자 입구와 출구의 공기 흐름으로서 단위는 mole/sec이며, c_e, c_o 는 동화상자 입구와 출구의 CO_2 농도이며 단위는 CO_2 (mole)/air(mole)이다.

적외선 CO_2 가스 측정법의 기본적인 원리는 측정하고자 하는 식물체나 식물체의 葉을 투명한 재질(아크릴)로 만들어진 동화상자(chamber)에 넣고 光을 비추어 주면 광합성작용에 의해 동화상자내의 CO_2 농도는 감소하게 되는데, 이때 CO_2 의 흡수속도를 측정하는 방법이다. 통기방식에 따라 두 가지 방식이 있다(그림 6)

(1) 폐쇄형(closed systems) : 밀폐된 同化箱子내에 식물체 혹은 잎 및 줄기를 넣은 후 일정한 시간이 경과하게 되면 광합성작용에 의해 同化箱子내의 CO_2 농도가 감소되게 되는데, 동화상자의 CO_2 농도의 감소율을 분석계로 분석하여 광합성속도를 계산하는 방법이다. 총순광합성(total net photosynthesis)은 식 (3)의 두 번째 항에 해당되는데, 그 계산식은 다음의 식(4)와 같다.

$$A'_n = \frac{(C_b - C_f)V}{\Delta t} \dots\dots\dots (4)$$

식에서 C_b 는 측정 시작시 동화상자내 CO_2 농도이고 C_f 는 측정 종료시 동화상자 내의 CO_2 농도로서 $C_b - C_f$ 는 일정시간내 동화상자내의 CO_2 농도의 변화로서 식 (3)의 dC 에 해당된다. C_b 및 C_f 의 단위는 CO_2 mole/air mole 이다. Δt 는 경과한 시간으로서 단위는 초(sec)이다. 단위면적 혹은 단위무게의 엽광합성은 식 (2)에 엽면적(L : 혹은 엽무게)으로 나누면 되는데, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_n = \frac{(C_b - C_f)V}{\Delta tL} \dots\dots\dots (5)$$

이 때 A_n 이 나타내는 단위는 $\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이다.

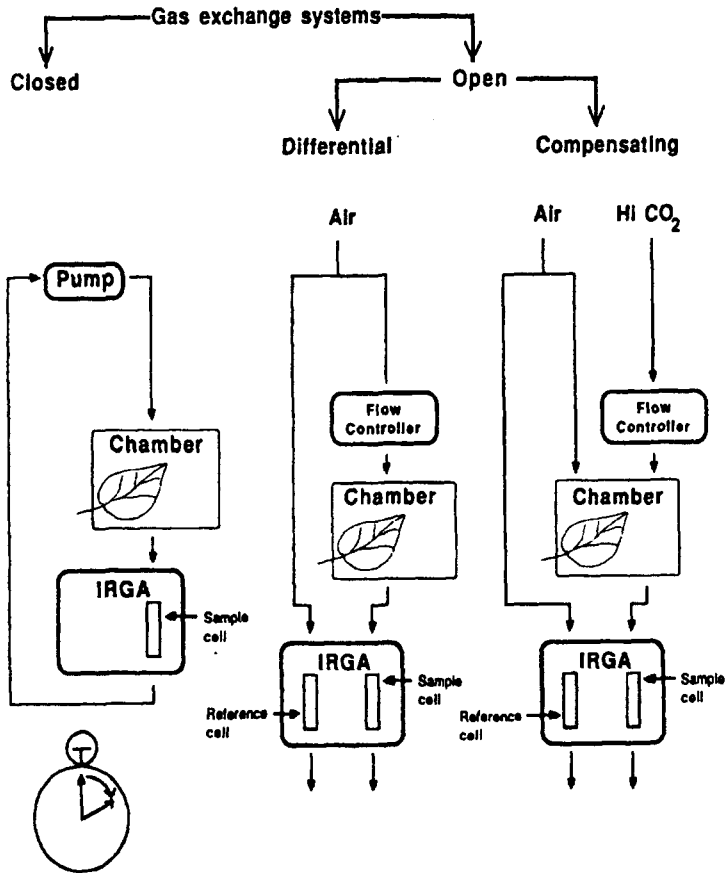


그림 6. 적외선 CO₂ gas 분석에 의한 광합성측정장치 모식도(Christopher et al, 1989)

(2) 개방형(open or steady-state systems) : 공기의 흐름이 연속적으로 同化箱子를 통과할 때, 동화상자내의 잎(혹은 식물체)의 광합성작용으로 출구로 배출되는 CO₂농도는 입구의 CO₂농도에 비해 감소되게 되며, 광합성속도, 호흡율 및 동화상자의 공기흐름이 일정해질 때, 균형을 이룬 CO₂의 감소율에 의해 광합성을 측정하는데 이러한 방법을 differential systems 라고 한다.

이때 순광합성(net photosynthesis)은 식 (3)의 우변 제1항에 해당되는데 다음의 식 (6)과 같이 계산한다.

$$A_n = \frac{u_e c_e - u_o c_o}{L} \dots\dots\dots (6)$$

식 (6)에서 u_e 는 同化箱子입구의 공기유입속도(air flow)이고, c_e 는 同化箱子입구유입공기의 CO_2 농도이며, u_o 는 同化箱子출구의 공기유입속도이고, c_o 는 同化箱子유출공기의 CO_2 농도이며, L 는 식물체의 표면면적 혹은 무게이다. 이때 A_n 의 단위는 $mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$ 이다.

differential systems와는 달리 同化箱子내의 잎(혹은 식물체)의 광합성으로 하여 감소된 CO_2 를 외부로부터 同化箱子내에 주입함으로써 同化箱子내의 CO_2 농도가 안정될 때, CO_2 의 주입속도에 의해 광합성을 측정하는 방법이 있는데 이러한 측정법을 compensating systems라고 한다. 이 때 광합성기관의 순광합성은 식 (3)의 제3항에 해당되는데, CO_2 의 유입량에 의해 계산한다.

식물의 광합성속도의 측정은 주로 이상의 방법과 같이 폐쇄형시스템과 개방형시스템이 있는데, 실제적인 측정에 있어서 폐쇄 및 개방법은 각기 그들의 특징이 있다. 폐쇄형측정 방법은 개방형측정방법에 비해 측정방법상의 제약으로 측정환경제어와 환경변화에 따른 광합성측정에 있어서는 적합하지 않다. 그러나 개방형방법에 비하여 필요되는 설비도 적고 측정도 간편한 이점이 있다.

2) 광합성측정장치(적외선 가스 분석법)

CO_2 분석계(적외선 CO_2 가스 분석계 : infrared gas analyzer), 기록계, 식물체의 측정부위를 넣을 수 있는 同化箱子, pump 및 조명장치 등이 필요하다. 여기에 환경에 따른 광합성속도의 변화를 측정하기 위해서는 이러한 환경을 조절할 수 있는 장치가 필요하다.

(1) 적외선 CO_2 가스 분석장치(infrared CO_2 gas analyser : IRGA)

적외선 가스 분석계의 원리는 기체분자가 종류에 따라 특정파장의 적외선을 흡수하는 특성을 이용한 것이다.

①적외선 가스 분석계 : 대체로 적외선 lamp, 시료 가스 측정셀(cell)과 대조셀 (cell) 및 검출기로 구성된다. 측정셀에는 시료가스가 통과하게 되며, 측정셀의 CO_2 분자에 의해 적외선이 흡수되므로 검출기에 도달되는 적외선 강도는 CO_2 농도에 비례하여 약해지게 된다. 검출기에서는 측정셀과 대조셀의 CO_2 농도차이를 측정한다. 대조셀은 밀폐 혹은 개방 방식에 따라 두 가지 즉, CO_2 가스가 포함되지 않은 N_2 가스가 밀봉된 것과 동화상자 입구의 공기를 통과시키는 것이 있다. 대조셀이 밀폐된 가스 분석장치에서는 CO_2 농도의 절대값을 측정하게 되는데(절대농도 측정방식), 측정범위는 약 0~500ppm CO_2 이며, 대조셀에 동화상자 입구의 공기를 통과시키는 가스 분석장치에서는 측정셀과 대조셀의 상대농도 즉 농도차이를 측정하게 되며(상대농도 측정방식) 그 측정범위는 약 $300 \pm 50PPm CO_2$ 이다.

②제습 : CO_2 분자의 적외선 흡수 파장대는 $2.7 \mu m$ 와 $4.3 \mu m$ 부근이며, 물분자와 산소 분자의 흡수 파장대는 $2.5 \sim 3 \mu m$ 로서 CO_2 의 흡수 파장대와 중복되는 부분이 있으며, 이러한 중복으로 인하여 측정오차가 발생하므로 측정셀에 유입되는 공기는 제습해야 한다. 제습방법에는 공기를 냉각하여 응결시키는 방법과 건조제를 사용하는 방법이 있는데, 이 두 과정을 직렬로 연결하여 제습하는 경우 제습효과가 좋다. 제습제로는 과염소산마그네슘이 많이 이용된다. 이외 물분자의 흡수파장대인 $2.5 \sim 3 \mu m$ 부분을 필터를 사용하여 제거하는 방법도 있다.

(2) 송풍 및 공기 공급장치

송풍 및 공기 공급장치에는 공기펌프, 공기공급선별기 및 유량계가 있다.

동화상자에 공기를 공급하기 위해서는 송풍장치가 필요하며, 사용 가능한 장치로는 송풍기, compressor, diaphragm식 air pump 등이 있으며 광합성측정시스템에 따라 적합한 장치를 선택할 수 있다.

공기공급선별기(airflow line selector)는 절대농도측정방식으로 측정할 경우, 동화상자 입구 및 출구의 공기는 airflow line selector를 통하여 적외선 가스 분석계에 각각 보내짐으로써 CO₂농도를 측정할 수 있다.

개방식 광합성측정시스템은 유량측정이 필요한데(폐쇄식시스템에서도 CO₂ 및 습도의 보정을 위하여는 유량측정이 필요함), 많이 사용하는 것들은 대체로 variable area flow meter, differential-pressure meter 및 mass flow meter가 있다. 식물개체 측정용 시스템의 경우는 15~150 l/min 범위가 적합하며, 식물체 개엽 측정용 시스템의 경우 1~10 l/min 범위가 적합하다.

(3) 조명장치

야외의 광합성 측정에서 자연상태의 태양광은 좋은 조건이기는 하지만 광량의 변화가 크기 때문에 일반적인 광합성측정, 특히 환경을 제어하여 광합성을 측정하거나 같은 광조건에서의 광합성차이를 측정하는 실험에서는 인공광원을 사용한다.

광합성작용의 유효복사 파장은 380~680nm이고, 녹색식물은 이중 370~710nm의 파장을 많이 흡수하므로 인공광원은 이 파장대와 비슷한 광이어야 한다. 광합성측정에 많이 사용되는 인공광원으로는 multivapor high intensity discharge (HID) lamp(400~1000W)나 quartz-halogen projection lamps(80~250W) 등이 있다.

(4) 동화상자

동화상자의 형상과 구조는 광합성속도 측정에 매우 중요한 영향을 미친다. 따라서 광합성속도 측정목적으로 볼 때, 동화상자는 다음과 같은 성능을 지녀야 한다.

- ① 광합성측정과정 중 CO₂농도와 습도가 일정하게 유지되어야 한다.
- ② 동화상자내 온도는 광합성측정에 장애가 없어야 한다.
- ③ 동화상자내 엽면경계층저항이 크지 않아야 한다.
- ④ CO₂ 흡수 및 증산에 대한 응답이 빨라야 한다.

동화상자의 제작재료로는 광 투과성이 좋고 가공이 쉬운 acrylic판이 많이 사용된다. 동화상자의 크기는 측정목적에 따라 달라지게 된다. 기공확산저항 및 엽면경계층저항을 고려하여 동화상자내에 소형팬을 설치함으로써 CO₂의 확산저항을 감소하고 CO₂농도 분포를 균일하게 할 수 있다.

3. 광합성계측 환경제어

1) 빛

빛의 강도는 광합성속도를 지배하는 가장 큰 환경요인이다. 圃場에서의 개체군 광합성은 입사되는 일사량, 동화능력, 엽면적지수 및 잎의 공간배치상태에 의해 결정되는데, 일사량의 다소는 광합성속도를 결정하는 가장 큰 요인이다. 그림 7은 광의 변화에 따른 광합성의 변화인데, 그림에서 볼 수 있듯이 광포화점 이하의 광도가 낮은 역에서는 강도가

높아짐에 따라 광합성속도가 급격히 빨라진다. 따라서 처리간이나 품종간의 광합성 능력을 비교하고자 하는 경우는 광포화점 이상의 광에서 광합성을 측정하여 비교하는 것이 바람직하다.

광원으로 인공광원을 이용하는 경우 선택된 lamp의 안정성이나 lamp 전원조작에 의해 빛의 세기가 변하게 된다. 따라서 광합성을 측정할 경우, lamp의 안정성을 정확히 점검해야 하며, 두 번째로, lamp 전원 스위치를 켜 후, 일정시간이 경과하여 광의 광도가 일정해진 후 광합성을 측정하여야 하며, 셋째로 lamp 전원의 전압변동이 광질에 영향을 미치기에 전압을 일정하게 조절하여야 한다.

자연광조건에서 광합성을 측정할 경우, 태양광의 입사방향에 따라 수광량이 달라지므로 식물엽의 착생각도, 광조건 및 수평면에서의 광도를 측정, 기록하여야 한다.

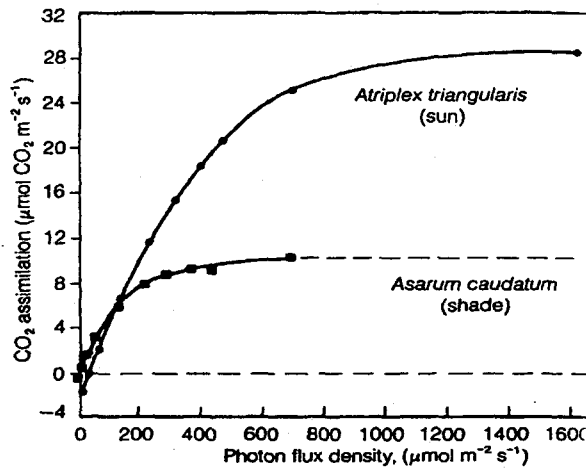


그림 7. Photon flux density의 변화에 따른 식물광합성의 변화(Harvey, 1979)

2) 온도

온도는 효소활성에 직접적인 관계가 있으며, 광합성반응, 호흡속도 등을 좌우하는 중요한 요인이다. 온도가 높아짐에 따라 광합성이 활발해지지만 어떤 온도를 초과하게 되면 반대로 광합성이 낮아지고 호흡작용이 활발해진다. 그림 8은 엽온의 변화에 따른 C₃ 및 C₄식물의 광합성에 미치는 영향이다. 따라서 동화상자를 이용한 일반적인 광합성속도측정 특히는 온도변화에 따른 광합성의 비교를 위한 광합성측정에서는 동화상자내의 온도를 일정하게 유지하여야 한다.

동화상자의 온도는 태양광선이나 인공광원의 가시광선 및 적외선부분의 조사에 의해 상승하게 된다. 동화상자의 온도제어는 일반적으로 passive method(에너지사용 없이 자연적인 에너지 교환에 의한 방법)와 active method(에너지공급에 의해 온도를 제어)가 있다.

passive method에 의해 동화상자의 온도는 대기의 온도와 비슷하게 제어할 수 있지만, 동화상자내의 온도를 다르게 제어하기에는 어려움이 있다. 동화상자 재질은 입사되는 가시광역과 근적외역의 빛의 흡수를 최소로 함으로써 동화상자내 온도상승을 억제할 수 있고, 열적외선을 효과적으로 투과함으로써 잎이나 기타 표면에서 방사되는 장파복사에 의

한 온도상승을 억제할 수 있는 것으로 선택해야 한다.

야외실험에서는 active method가 많이 이용되는데, 대체로 다음의 세 가지 방법 즉, compressor-based refrigerators에 의한 냉각, electrical resistance heaters에 의한 가열 및 thermoelectric heat pump에 의한 냉각과 가열 등에 의해 동화상자의 온도를 제어한다. 이때 동화상자의 재질은 반드시 열전도도가 높아야 한다. 이 방법에 의해 동화상자의 온도를 여러 가지로 제어가 가능하지만 많은 비용이 소요된다.

이외에 lamp의 밑에 물 필터 혹은 동화상자에 수막을 부착하여 흐르는 물에 의해 동화상자의 온도를 제어하는 방법이 있다.

3) CO₂ 농도

이산화탄소(CO₂)는 광합성작용에 있어서 암반응계의 기질로 그 농도는 광합성의 암반응 속도에 관여하는 동시에 기공의 開度에도 영향을 끼쳐서 CO₂확산과정의 효율을 좌우하는 것으로 알려져 있다. 대기중의 CO₂ 농도가 높아짐에 따라 식(1)에서의 $\psi_a - \psi_c$ 가 커지게 되므로 CO₂擴散량이 증가되어 광합성속도가 빨라지는데, 그림 9는 CO₂농도에 따른 식물 광합성의 변화이다.

광합성측정은 짧은 시간동안의 CO₂ 흡수를 측정하는 과정으로서 도입공기의 CO₂ 농도 변화는 광합성측정에 매우 큰 측정오차를 유발하게 된다. 대기중의 CO₂농도는 계절에 따라 변하며, 일 변화 및 짧은 시간내에도 많은 변화가 있다. 또한 공기중의 CO₂ 농도는 지표부근보다는 높은 곳에서 변화가 적고 바람이 있을 경우에는 확산이 빠르기 때문에 대기중의 CO₂농도변화가 적다. 따라서 일반적으로 통풍이 좋은 높은 장소에서 공기를 흡입하여 이용하거나 충분한 량의 공기를 주입하여 두었다가 광합성측정에 사용한다.

식물의 광합성측정연구에서는 CO₂농도를 달리하여 광합성을 측정하는 경우가 있는데, 이때에는 CO₂-free air과 pure CO₂나 고농도 CO₂ gas를 gas-mixing system을 사용하여 필요한 CO₂ 농도로 되게끔 혼합한다. gas-mixing system으로는 일반적으로 precision mixing pump와 mass-flow controller이다.

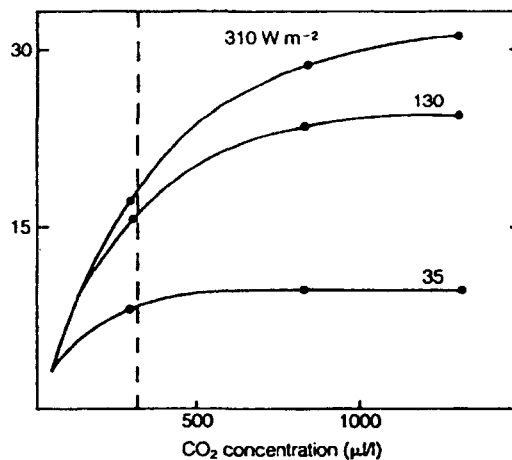


그림 9. CO₂ 농도에 따른 사탕무우 잎의 광합성속도 변화

4) 습도조절

대기의 습도가 낮아 포차가 커지게 되면 증산속도가 빨라지고 이에 따라서 식물의 수분 포텐셜이 낮아져 잎의 氣孔이 닫히게 되므로 기공저항이 증대하여 광합성속도가 낮아지게 된다. 따라서 광합성을 측정시 동화상자에 공급하는 공기의 습도를 조절하여야 한다.

공기의 습도조절은 가습기와 제습기에 의해 조절되는데, 습도의 조절방법은 air tank의 공기를 공기펌프로 가습기에 보내 가습시키고, 가습 된 공기를 제습기에 보내서 제습한다. 가습기는 온도조절이 가능한 항온수조에 넣어 임의의 온도에서 수분이 포화된 공기로 만들고, 제습기는 일정온도를 유지함으로써 수분을 응결시켜 제습한다. 제습기를 거친 공기의 온도(제습기의 온도)가 배관, 측정실 및 동화상자내벽 등의 온도보다 높을 경우, 이러한 물체의 표면에서 수분이 응결되므로 광합성측정에 오차가 발생하여 정확한 측정을 기대하기 어렵다. 따라서 수분의 응결을 위하여서는 가스배관에 ribbon heater를 감아 heater에 의해 배관의 온도를 유입가스의 온도보다 높게 조절하거나 혹은 도입공기 습도 조절을 위한 제습기의 노점온도(dew point)를 주위의 가장 낮은 온도보다 2℃ 이상 낮게 설정함으로써 수분의 응결을 방지할 수 있다.

인 용 문 헌

- 矢吹萬壽, 1985. 植物の動的環境. 朝倉書店.
- Christopher, B.F, J.T. ball and J. A.B. Joseph. 1989. Photosynthesis: principles and field techniques. In : Plant Physiological Ecology. Chapman and Hall inc., USA. pp : 209-248
- Harvey, G.W. 1979. Photosynthetic performance of isolated leaf cells from sun and shade plants. Carnegie Inst. Washington Yearbook. 79 : 161-164
- Hurewitz, A., M.Maletta and H.W. Janes, 1984. The effects of root-zone heating at normal and cool air temperatures on growth and photosynthetic rates of tomatoes. Acta Horticulture, 148 : 871.
- Jarvis, P.G., C.W. Rose and J.E. Begg. 1966. Plant-water relationships. Academic Press, N. Y.
- Katsu I. and Yoshio M. 1978. Effect of carbon dioxide concentration on growth and dry matter production of crop plants. Japan. Jour. Crop Sci. 47(4) : 587-595
- Larcher, W. 1995. Physiological plant ecology. Springer-Verlag. N. Y. pp : 57-166
- Peter R.H. and A.J. Peter. 1978. Effect of greenhouse CO₂ enrichment on the yield and photosynthesis physiology of tomato plant. Can. J. Plant Sci. 58 : 801-817
- Rijtema. 1965. Wageningen res. Rep., pp : 659
- Varlet-Grancher, C., R. Bonhomme and H. Sinoquet. 1993. Crop structure and light microclimate. INRA. Paris. pp : 419-425.