

폐쇄형 묘생산 시스템의 에너지 수지 분석⁺

Analysis of Energy Balance in Closed Transplants Production System⁺

김진국^{1*} · 김용현² · 이상현¹ · 이명규¹ · 최유화¹

¹전북대학교 대학원 농업기계공학과

²전북대학교 농과대학 생물자원시스템공학부(농업과학기술연구소)

Kim, J.K.^{1*} · Y.H. Kim² · S.H. Lee¹ · M.G. Lee¹ · Y.H. Choi¹

¹Dept. of Agricultural Machinery Eng., Graduate School, Chonbuk National Univ., Jeonju 561-756, Korea

²Division of Bioresource Systems Eng., Chonbuk National Univ., Jeonju 561-756, Korea (The Institute of Agricultural Science & Technology)

서론

최근 들어 육묘기술이 빠르게 발전하면서 플러그 묘의 보급이 확대되고 있으며 육묘와 재배의 분업화가 진행되고, 고품질 묘의 안정된 수급에 대한 관심이 늘어나면서 육묘 산업에 대한 비중이 점차 증가하고 있다.

현재 국내에 설치되어 있는 육묘시설은 대부분 개방형 묘생산 시스템(open system for transplant production)으로 자연광을 이용하는 장점은 있으나 여름철의 냉방과 겨울철의 난방에 소요되는 비용은 상당한 수준에 이르고 있다. 더구나 효율적인 환경제어를 위하여 차광과 보온 등의 시설이 필요하며, 또한 관리노력이 적지 않게 요구되고 있다.

폐쇄형 묘생산 시스템(closed system for transplants production)은 자연광이 투과되지 않도록 단열재로 구성되어 있어 시스템 내부와 외부의 공기, 물, 열 등의 교환이 기본적으로 제한된다.

그러므로 폐쇄형 묘생산 시스템을 이용하면 고품질 묘의 대량생산이 가능할 뿐만 아니라 양적·질적·계획적인 생산이 가능하며 노지재배(open field)에 비해 계절에 대한 의존도가 매우 작기 때문에 시장의 수요에 대하여 탄력적으로 대처할 수 있는 장점을 지니고 있다(Merle and Alan, 1995).

그러나 폐쇄형 묘생산 시스템은 광원으로서 형광등을 사용하며 식물생육에

*본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00391-0)지원으로 수행되었음.

필요한 시스템 내의 온도, 습도, 광주기, 광량 등의 적정환경을 제어하기 위한 모든 장치가 전기에너지에 의해서 구동되고 있다.

본 연구의 구체적인 목적은 컴프레서, 히터 및 가습기로 구성된 공조기구, 형광등을 이용한 인공광원부, 기류속도 제어용 팬 등과 같이 폐쇄형 묘생산 시스템을 구성하고 있는 각종 기기들의 에너지 소모량을 분석하고 시스템의 에너지 절감방안을 제시하는 데 있다.

재료 및 방법

가. 에너지 수지

1일 평균 조명기구에 의해서 소비된 에너지(W_L)는 1일 평균 조명기구에 의해서 식물체에 조사된 단파에너지(S), 장파에너지(L) 및 조명기구와 주변공기 사이의 현열전달량(Q_{SL})의 합과 같다. 이때 조명기구에 의해서 조사된 에너지의 일부가 육묘베드에서 현열로 변환되나, Q_{SL} 에 포함하는 것으로 가정하였다.

$$W_L = S + L + Q_{SL} \quad (1)$$

장파 에너지(L)는 식물체와 주변공기 사이의 현열(Q_{SP}), 잠열(Q_{LP}) 및 조명기구에 의해 식물체 개체군에 조사된 1일 평균 단파에너지(S)와 광합성에 의해 고정된 식물체의 화학에너지(Q_{AP})의 합과 같다. 한편 본 실험에서 광원에 의한 반사효과는 무시하였다.

$$S + L = Q_{SP} + Q_{LP} + Q_{AP} \quad (2)$$

팬, 가습기 등 실내설비의 1일 평균 에너지 소비량(W_E)이 주변 공기와의 현열전달량(Q_{SE})과 같다고 가정하면 다음과 같이 표시된다.

$$W_E = Q_{SE} \quad (3)$$

1일 평균 발생하는 총현열(Q_S)은 조명기구와 주변공기와의 현열전달량(Q_{SL}), 실내설비와 주변 공기와의 현열전달량(Q_{SE}), 식물체와 주변 공기와의 현열전달량(Q_{SP}), 환기에 의한 시스템 내부와 외부사이의 현열전달량(Q_{SV}), 가습기에 의해 시스템 내에서 발생한 현열의 일부가 잠열변환량(Q_{LE}) 및 히터로부터 시스템 내에 공급한 현열량(Q_{SH})의 총합으로 구할 수 있다. 가습기에 의해 시스템 내에서 발생한 현열의 일부는 잠열로 변환되며, 히터에서 발생한 현열량과 히터에서 발생한 열량이 같다고 가정하면 다음과 같이 표시된다.

$$Q_S = Q_{SL} + Q_{SP} + Q_{SE} + Q_{SV} - Q_{LE} + Q_{SH} \quad (4)$$

1일 평균 발생하는 총잠(Q_L)은 1일 평균 발생한 가습기와 주변공기와의 잠열전달량

(Q_{LE}), 1일 평균 발생한 식물체와 주변공기와의 잠열전달량(Q_{LP}) 및 환기에 의해 발생한 시스템 내부와 외부 사이의 잠열전달량(Q_{LV})의 합으로 구할 수 있다.

$$Q_L = Q_{LP} + Q_{LE} + Q_{LV} \quad (5)$$

공조기구에 대한 성능계수의 평균치는 1일 평균 공조기구에 의한 소비량(W_C)에 대한 시스템 내에 발생한 현열과 잠열의 합($Q_S + Q_L$)에 의해 결정된다.

$$C = \frac{|Q_S + Q_L|}{W_C} \quad (6)$$

나. 에너지 소비량 측정 및 계산

1일 평균 조명기구, 공조기구, 가습기, 팬 등의 실내설비에 의해 소비된 전기에너지 즉, W_L , W_C , W_E 값들은 각각 적산전력계를 이용하여 측정하였다.

1일 평균 조명기구에 의해 식물체 개체군에 조사된 단파에너지 S 는 전천일사계(NP-42, EKO)를 이용하여 측정하였다. 한편 1일 평균 조명기구에 의해 식물체개체군에 조사된 장파에너지 L 은 순방사계(MF-11, EKO)를 이용한 측정치와 단파에너지 S 의 차로써 결정된다. 따라서 조명기구와 주변공기 사이의 현열전달량 Q_{SL} 는 식(1)에 의해서 계산된다.

식물체의 광합성에 의해 고정된 화학에너지량은 측정 기간동안 식물체 개체군의 건물중 증가량과 건물중 1g당의 화학에너지량($\approx 20\text{kJ/gDW}$)를 이용하여 구하였다. 또한 식물체와 주변공기와의 잠열에너지 전달량 Q_{LP} 는 플러그트레이로부터의 증발산량과 물의 증발잠열($\approx 2.4\text{kJ/g}$)에 의해 구하였다. 식물체와 주변 공기와 의 현열전달량 Q_{SP} 는 식(2)에 의해서 결정된다.

가습기에 의해 시스템 내에서 발생한 현열의 일부가 잠열로 변환되는 양, Q_{LE} 는 가습량과 물의 증발잠열($\approx 2.4\text{kJ/g}$)을 이용하여 구하였다.

환기에 의한 시스템 내부와 외부 사이의 현열전달량 Q_{SV} 와 시스템 내부와 외부사이의 잠열전달량 Q_{LV} 은 환기회수($\approx 0.125\text{회/day}$), 환기전열량(kcal)과 공기의 밀도($\approx 1.2\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), 비열($\approx 0.24\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$), 실내체적, 공기의 비체적($\approx 0.83\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), 물의 증발잠열($\approx 2.4\text{kJ/g}$), 시스템 내부와 외부의 절대습도에 의해 결정된다. 각각의 구해진 수치들은 재배면적으로 나누어 단위면적당 에너지수치를 결정하였다.

본 연구에서는 시스템에 가해진 총에너지에 대한 식물체의 광합성에 의해 고정된 화학에너지량(Q_{AP})의 비율을 전기에너지 이용효율(E)로 정의하였으며 시스템에 가해진 단파에너지에 대한 식물체의 광합성에 의해 고정된 화학에너지량(Q_{AP})의 비율을 단파에너지 이용효율(E_s)로 정의하였다.

다. 공시 품종 및 실험 조건

본 실험에 사용된 공시재료는 조직 배양한 감자 조직배양묘(*Solanum tuberosum* L. cv. *Dejima*)로서 폐쇄형 묘생산 시스템에서 온도 20℃, 상대습도 70%, 광주기 16/8h,

광량 $50\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 키위 플러그트레이에 옮겨 심은 후 경삽에 의한 삼수 증식법에 의해서 증식되었다. 50공 플러그트레이에 경삽을 실시한 후 온도 20°C , 습도 90%, 광주기 16/8 h, 광량 $50\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 실험 개시 후 1일째는 24시간 암조건에 두었다가 2일째부터 16/8h의 광주기 하에서 4일간 발근을 실시하였다. 5일간의 발근 과정 후 본 실험의 재료로 사용하였으며 15간 실험을 수행하였다.

광량에 따른 폐쇄형묘생산시스템 내의 에너지 수지를 분석하고자 온도 20°C , 상대 습도 70%, 광주기 16/8h의 조건 하에서 광합성유효광량자속을 $100\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $150\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $250\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 4수준을 두어 실험을 수행하였다.

라. 성장 조사

식물이 광합성으로 말미암아 증가된 화학에너지량을 계산하고자 생체중과 건물중을 측정하였다. 이를 위하여 육묘기간 15일 동안 5일 간격으로 각 처리당 10주씩 채취하고 전자저울(FA300KV, A&D Co.)을 이용하여 생체중과 건물중을 측정하였다. 건물중은 시료를 50°C 에서 72시간 동안 건조기(ON-21, JEIO TECH Co.)에 넣어 건조시킨 후 측정하였다.

결과 및 고찰

15일간 소비된 전기에너지는 조명장치, 컴프레서, 히터, 팬, 가습기의 순서로서 각각 1531kWh, 1188kWh, 545kWh, 76kWh, 48kWh 였으며 구성비율은 컴프레서 35%, 히터 16%로서 공조기구가 전체의 51%를 차지하였으며 나머지는 인공광원 46%, 팬 2%, 가습기 1%로 나타났다(그림 1).

1일평균 조명기구에 의해서 소비된 에너지(W_L), 조명기구에 의해 식물체에 조사된 단파에너지(S) 및 장파에너지(L)는 각각 $53.2\text{MJ}/\text{m}^2$, $10.9\text{MJ}/\text{m}^2$, $11.4\text{MJ}/\text{m}^2$ 이었으며 조명기구와 주변공기 사이의 현열전달량(Q_{SL})은 $30.9\text{MJ}/\text{m}^2$ 로 나왔다. 식물체와 주변공기 사이에 현열(Q_{SP}), 잠열(Q_{LP}) 및 식물체가 광합성에 의해 고정된 화학에너지(Q_{AP})는 $9.7\text{MJ}/\text{m}^2$, $12.3\text{MJ}/\text{m}^2$, $0.6\text{MJ}/\text{m}^2$ 이었다. 式(3)과 式(4)에 의해서 계산된 1일 평균 총현열(Q_S)과 하루 평균 발생하는 총잠열(Q_L)은 각각 $50.5\text{MJ}/\text{m}^2$, $27.0\text{MJ}/\text{m}^2$ 이었다. 1일 평균 공조기구에 의한 소비량(W_C)에 대한 시스템 내에 발생한 총잠열과 총현열($Q_S + Q_L$), 즉 공조기구의 성능계수는 1.29로 나타났다. 시스템에 가해진 에너지 또는 단파에너지에 대한 식물체의 광합성에 의해 고정된 화학에너지(Q_{AP})와의 비율을 나타내는 전기에너지 이용효율(E)과 단파에너지 이용효율(E_s)은 각각 0.005, 0.0543로 나타났다.

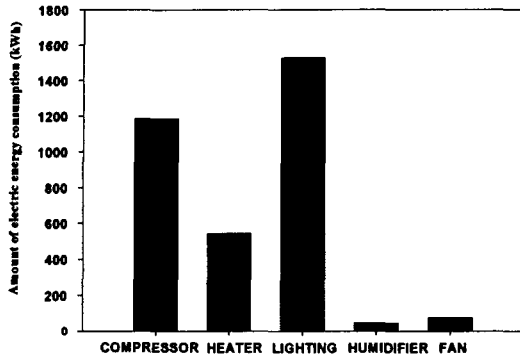


Fig. 1. Electric energy consumed in the closed transplants production system.

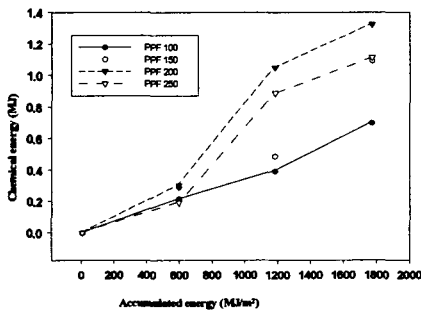


Fig. 2. Chemical energy transformed by photosynthesis as affected by photosynthetic photon flux at different growth stages.

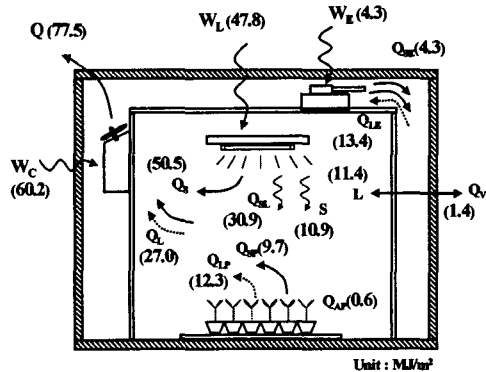


Fig. 3. Energy balance in the closed transplants production system.

본 실험에서는 광원과 육묘용 트레이와의 거리를 조절하여 광량을 조절하였는데, 앞으로 광원과의 적정거리 설정에 따라 사용된 램프수를 조절하고 조명시스템의 반사효율을 높이면 묘생산 시스템에서 소비되는 전기에너지를 크게 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 한편, 팬과 가습기가 소비하는 전기에너지는 각각 전체에너지의 2%, 1%에 불과하여 전체 시스템의 에너지 소비량에 비해 매우 작게 나타났다.

그림 2는 4개의 광량 처리에 대해 15일 동안 5일 단위로 투입된 에너지에 대한 화학에너지 증가량을 나타낸 것이다. 화학에너지의 증가량은 5일차, 10일차, 15일차의 건물중에서 0일차의 건물중을 제외한 증가분에 대한 화학에너지 값이다. 초기 5일 동안 광량처리에 따른 화학에너지 증가량이 유사하게 나타났으나 실험 개시 후 10일, 15일째에는 약광에 비해 강광 하에서 좀 더 높은 에너지 이용효율을 나타내었다. 그림 3은 본 시스템을 구성하는 각각의 에너지수치들에 대한 결과를 나타낸 것이다.

요약 및 결론

폐쇄형 묘생산 시스템내의 에너지 수지를 구명하고자 본 실험을 수행하였다. 에너지 소비는 인공광원 46%, 컴프레서 35%, 히터 16%, 팬2%, 가습기 1%로 구성되었다. 전기에너지이용효율(E)과 단파에너지이용효율(E_s)는 0.005과 0.0543으로 이용효율을 증가시키기 위해서는 시스템 내에 투입되는 에너지를 줄이며 식물의 광합성에 의해 증가되는 화학에너지의 증대방안이 모색되어야 한다. 실험 개시 후 10일~15일째의 화학에너지 증가량은 $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $250\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $150\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $100\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 순서로 나타났으며, $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 과 $250\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 더 많은 화학에너지 증가량을 보였다. 앞으로 폐쇄형 묘생산 시스템 내의 온도, 습도, 광주기 등의 생육환경의 변화에 따른 에너지 소비량을 분석하고 에너지 절감방안과 묘소질이 우수한 묘의 생산을 목표로 하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

인용문헌

1. 김용현. 2000. 농업기계학 분야에서 바이오테크놀러지의 응용-폐쇄형 식물묘 생산 시스템 개발을 중심으로. 한국농업기계학회지 25(4):311-326.
2. 김용현, 박현수. 2001. 인공광하에서 접목묘의 증발산속도에 미치는 상대습도와 광합성유효광량자속의 효과. 한국농업기계학회지 26(4):379-384.
3. 김용현. 2002. 접목묘 활착과정의 소비전력 및 전력요금 분석. 농업기계학회 학술대회 논문집 7(1):204-209.
4. Merle H and J. Alan. 1995. Protected Agriculture -A Global Review. The World Bank.
5. 大山克己, 吉永慶太, 古在豊樹. 2000. 閉鎖型苗生産システムのエネルギーおよび物質収支 -エネルギー収支. 植物工場學會誌 12(3):160-167.