

폐쇄형 묘생산 시스템의 광주기에 따른 에너지 수지 분석⁺

Analysis of Energy Consumption by Photoperiod in Closed Transplants Production System

김진국¹ · 김용현² · 이명규^{1*} · 최유화¹

¹전북대학교 대학원 농업기계공학과

²전북대학교 농과대학 생물자원시스템공학부(농업과학기술연구소)

Kim, J.K.¹ · Y.H. Kim² · M.G. Lee^{1*} · 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)

서 론

현재 국내에 설치되어 있는 육묘시설은 대부분 개방형 묘생산 시스템(open system for transplant production)으로 여름과 겨울철의 냉·난방비가 상당한 수준에 이르고 있으며, 관리노력이 적지 않게 들고 있다. 반면에 폐쇄형 묘생산 시스템(closed system for transplant production)의 경우 에너지의 흐름이 제한되어있어 생육환경 조건과 제어방식에 따라서 에너지의 사용량이 결정된다.

김 등(2002)은 인공광을 이용한 접목묘 활착촉진 장치에서 종별 전력요금의 종류에 따라 접목묘 활착과정 동안의 소비전력 및 전력요금 분석하였다. 大山 등(2000)은 고구마 육성시, 폐쇄형 묘생산 시스템 내의 에너지수지를 파악하고 시스템 내의 각각의 기기들의 전기에너지 소비량, 열에너지 및 식물체에 고정된 화학에너지를 측정하였다. 본 연구의 목적은 적정 생육환경을 제어하기 위한 컴프레서, 히터 및 가습기로 구성된 공조기구, 형광등을 이용한 인공 광원부, 기류속도 제어용 팬 등과 같이 폐쇄형 묘생산 시스템을 구성하고 있는 각종 기기들의 에너지 소모량을 분석하고 시스템의 에너지 절감 방안을 제시하는데 있다.

재료 및 방법

가. 에너지 수지

조명기구에 의해서 소비된 1일 평균 에너지(W_L)는 조명기구에 의해서 식물체에 조사된 단파에너지(S), 장파에너지(L) 및 조명기구와 주변공기 사이의 현열

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

전달량(Q_{SL})의 합과 같다. 이때 조명기구에 의해서 조사된 에너지의 일부가 육묘베드에서 현열로 변환되나, (Q_{SL})에 포함하는 것으로 가정하였다(김, 2003).

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

장파 에너지는 식물체와 주변공기 사이의 현열(Q_{SP}), 잠열(Q_{LP}) 및 조명기구에 의해 식물체 개체군에 조사된 1일 평균 단파에너지와 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.

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

1일에 발생하는 평균 총현열(Q_S)은 조명기구와 주변공기와의 현열전달량, 실내설비와 주변 공기와의 현열전달량, 식물체와 주변 공기와의 현열전달량, 환기에 의한 시스템 내부와 외부사이의 현열전달량(Q_{SV}), 가습기에 의해 시스템 내에서 발생한 현열의 일부가 잠열변환량(Q_{LE}) 및 히터로부터 시스템 내에 공급된 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.

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

1일에 발생하는 평균 총잠열(Q_L)은 가습기와 주변공기와의 잠열전달량(Q_{LE}), 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 단파에너지는 전천일사계(NP-42, EKO)를 이용하여 측정하였다. 한편 1일 평균 조명기구에 의해 식물체개체군에 조사된 장파에너지는 순방사계(MF-11, EKO)를 이용한 측정치와 단파에너지의 차로써 결정된다. 따라서 조명기구와 주변공기 사이의 현열전달량은 식(1)에 의해서 계산된다.

식물체의 광합성에 의해 고정된 화학에너지량은 측정 기간동안 식물체 개체군의 건물중 증가량과 건물중 1g당의 화학에너지량($\approx 20 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW}$)를 이용하여 구하였다. 또한 식물체와 주변공기와의 잠열에너지 전달량은 플러그트레이로부터의 증발산량과 물의 증발잠열($\approx 2.4 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)에 의해 구하였다. 식물체와 주변 공기와의 현열전달량은 식(2)에 의해서 결정된다. 가습기에 의해 시스템 내에서 발생한 현열의 일부가 잠열로 변환되는 양은 가습량과 물의 증발잠열을 이용하여 구하였다.

환기에 의한 시스템 내부와 외부 사이의 현열전달량과 시스템 내부와 외부사이의 잠열전달량은 환기회수($\approx 0.125 \text{ d}^{-1}$), 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, 시스템 내부와 외부의 절대습도에 의해 결정된다. 각각의 구해진 수치들은 재배면적으로 나누어 단위면적당 에너지수치를 결정하였다.

본 연구에서는 시스템에 가해진 총에너지에 대한 식물체의 광합성에 의해 고정된 화학에너지량의 비율을 전기에너지 이용효율(E)로 정의하였으며 시스템에 가해진 단파에너지에 대한 식물체의 광합성에 의해 고정된 화학에너지량의 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 Kim 등(2002)이 개발한 폐쇄형 묘생산 시스템에서 온도 20°C, 상대습도 70%, 광주기 16/8 h, 광합성유효광양자속(photosynthetic photon flux, PPF) $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 키워 플러그트레이에 옮겨 심은 후 경삽에 의한 삼수 증식법에 의해서 증식되었다. 50공 플러그트레이에 경삽을 실시한 후 온도 20°C, 습도 90%, 광주기 16/8 h, PPF $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 실험 개시 후 1일째는 24시간 암조건에 두었다가 2일째부터 16/8 h의 광주기 하에서 4일간 발근을 실시하였다. 5일간의 발근 과정 후 본 실험의 재료로 사용하였으며 15일 동안 실험을 수행하였다.

광량에 따른 폐쇄형 묘생산 시스템 내의 에너지 수치를 분석하고자 온도 20°C, 상대습도 70%, 광주기 16/8 h의 조건 하에서 4수준(100, 150, 200, 250 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)의 PPF를 설정하였다.

결과 및 고찰

가. 인공광원, 공조기구 소비전력량 및 전기에너지 소비율

광주기 처리 16/8 h에서 $53.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 12/12 h에서 $39.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 8/16 h에서 $25.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 명기가 짧아짐에 따라 인공광원에 의한 소비전력량은 감소하였다(그림 1(a)). 컴프레서의 소비전력량은 광주기 처리 16/8 h에서 $41.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 12/12 h에서 $40.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 8/16 h에서 $38.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 나타났다(그림 1(b)).

본 실험에 사용된 시스템의 공조기구는 PID제어기에 의해서 작동된다. 24시간 컴프레서를 가동하면서 그 사이에 히터가 작동하여 온도를 제어한다. 따라서 컴프레서는 항상 작동되기 때문에 습도처리, 광주기 처리에서 거의 비슷한 소비전력을 나타내었다.

공조기구에 의한 전체 소비전력량은 광주기 처리 8/16 h에서 $72.2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 12/12 h에서 $67.1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 16/8 h에서 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 나타나 암기가 증가함에 따라 소비전력량은 약 17%가 상승하였다. 히터의 전력사용량은 광주기 처리 8/16 h에서 $33.6 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 12/12 h에서 $26.9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 16/8 h에서 $18.9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 나타났다. 광주기가 짧아짐에 따라 히터가 소모한 전력사용량은 증가하였다. 폐쇄형 묘생산 시스템 내부 기기들의 전기에너지 사용량의 차이는 광주기 처리에서 전체 사용량에 비해 볼때 컴프레서, 가습기, 팬의 전기에너지 소모량이 명기가 줄어들어 따라 전체 전기에너지 사용량의 약 14.2%로 감소하였다.

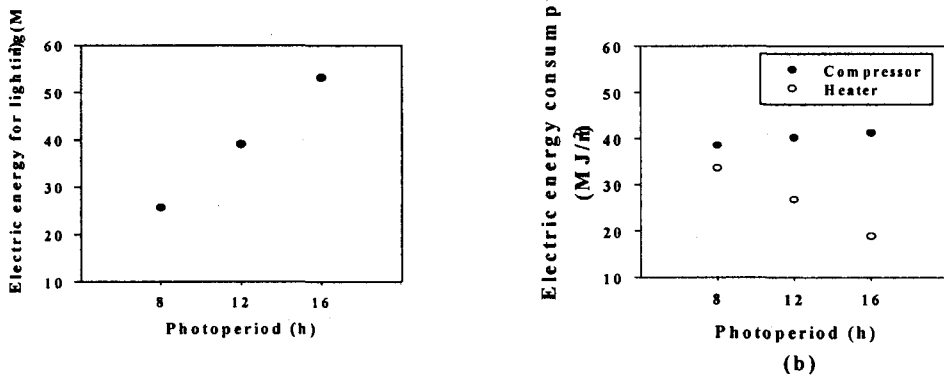


Fig. 1. Amount of electric energy consumptions in (a)lighting system and (b)air conditioning units.

나. 현열, 잠열, 전기에너지 및 단파에너지 이용효율

그림 2는 폐쇄형 묘생산 시스템 내의 현열과 잠열의 변화를 나타낸 것이다. 잠열과 현열은 서로 반비례적으로 증가와 감소를 나타내었다. 상대적으로 높은 광주기 처리에서는 명기가 증가함에 따라 현열이 증가하였다.

그림 3은 전체 시스템의 투입에너지에 대한 식물체의 광합성에 의한 화학에너지로 정의되는 전기에너지 이용효율의 광 주기 처리에 대한 값을 나타낸 것이다. 전기에너지 이용효율은 습도가 높을수록, 명기가 길수록 높게 나타났다.

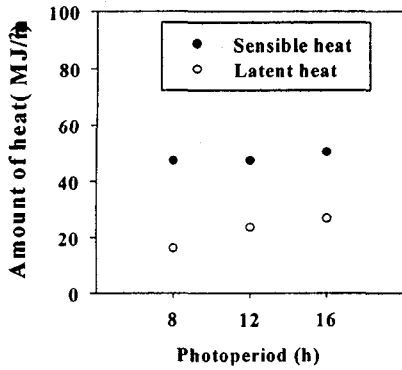


Fig. 2. Amount of latent and sensible heat as affected by photoperiod.

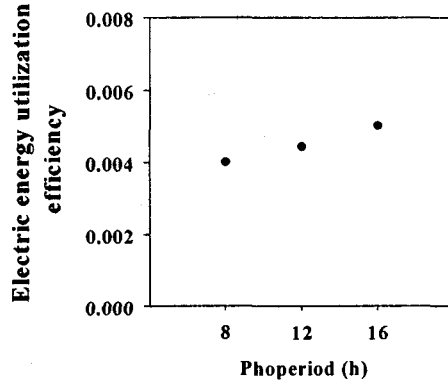


Fig. 3. Electric energy utilization Efficiency as affected by photoperiod.

그림 4는 인공광원의 단파에너지의 투입에 대한 식물체의 광합성에 의한 화학에너지 증가량의 비율을 나타내는 습도와 광주기에 따른 단파에너지 이용효율을 나타낸 것이다. 단파에너지 이용효율은 광주기 8/16 h에서 0.074, 12/12 h에서 0.059, 16/8 h에서 0.054로 나타났다. 단파에너지이용효율은 명기가 짧을수록 높게 나타났다.

광주기 처리에서의 전기에너지 이용효율은 광주기가 길수록 높게 나타났다. 한편 광주기가 짧을수록 단파에너지의 조사량은 적었지만 상대적으로 건물중의 증가가 많았기 때문에(그림 5) 단파에너지 이용효율은 광주기가 짧을수록 높은 값을 가졌다. 따라서 전기에너지 이용효율과 단파에너지 이용효율의 차이가 나타난 것으로 판단된다. 폐쇄형 묘생산 시스템의 에너지 소비 측면에서는 에너지이용효율, 순수한 광에너지 투입에 대한 식물체의 건물중 증가량만을 비교할 경우에는 단파에너지 이용효율의 고려가 필요할 것이다.

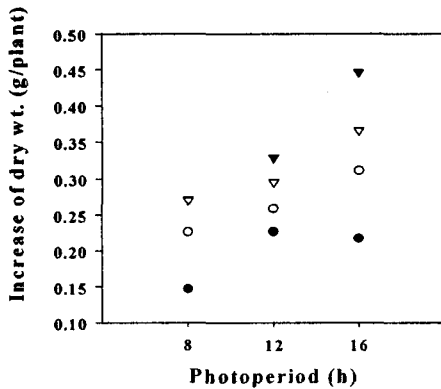


Fig. 5. Increase of dry weight as affected by photoperiod.

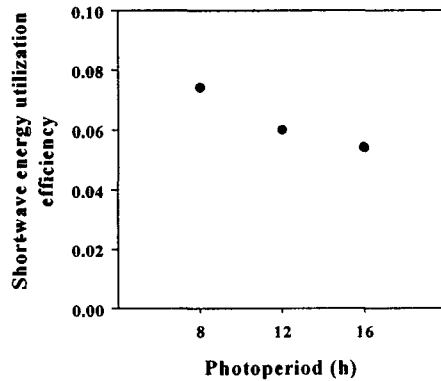


Fig. 4. Short-wave energy utilization efficiency as affected by photoperiod.

요약 및 결론

전체 전기에너지 소모량은 광주기 처리에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났고 인공광원에 의한 소모량은 인공광원의 조명시간에 가장 큰 영향을 받았다. 한편 공조기구에 의한 전력소비량은 짧은 광주기에서 많은 에너지를 소모하였다.

전기에너지 이용효율은 명기가 짧아짐에 따라 감소하였다. 단파에너지 이용효율은 광주기 처리 8/16 h에서 0.074로 가장 높았다. 광주기 처리 8/16 h는 명기가 가장 짧기 때문에 감자 플러그묘에 조사된 광에너지는 가장 적었지만 상대적으로 다른 처리에 비해 높은 화학에너지 증가량을 나타내었다. 따라서 광주기 처리 8/16 h에서 감자 플러그묘가 광주기가 짧은 데도 불구하고 다른 처리에 비해 더 많은 화학 에너지 증가량 때문에 단파에너지 이용효율이 가장 높았다.

이러한 에너지소모량과 단파에너지 이용효율을 고려하면 폐쇄형 묘생산 시스템은 공조기구들에 있어서 좀더 효율적인 제어방식의 도입이 필요하며, 묘의 밀식재배가 불가피하다. 또한 인공광원의 전력사용량을 줄일 수 있는 조광 장치를 도입한다면, 전기에너지 소비를 줄이면서 묘생산 단가를 낮출 수 있다고 판단된다.

인용문헌

1. Kim, Y.H., Kim, J.K., Lee, S.H., Choi, Y.H., Lee, M.G. and Kim, H.J. 2002. Production of potato transplants under controlled environment. ASAE Paper No. 024114.
2. 김용현. 2002. 접목묘 활착과정의 소비전력 및 전력요금 분석. 한국농업기계학회 학술대회 논문집 7(1):204-209.
3. 김진국. 2003. 폐쇄형 묘생산 시스템의 에너지 및 수분 수지 분석. 전북대학교석사학위 논문.
4. 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.