

## 폐쇄형 묘생산 시스템의 에너지 수지 분석<sup>1)</sup>

김진국 · 김용현<sup>1\*</sup> · 이명규 · 최유화

전북대학교 대학원 농업기계공학과, <sup>1</sup>전북대학교 농업생명과학대학 생물자원시스템공학부(농업과학기술연구소)

## Analysis of Energy Balance in Closed Transplants Production System

Kim, J.K., Y.H. Kim<sup>1\*</sup>, M.G. Lee, and Y.H. Choi

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

<sup>1</sup>Division of Bioresource Systems Eng., Chonbuk National Univ., Jeonju 561-756, Korea

(The Institute of Agricultural Science & Technology)

**Abstract.** This study was conducted to analyze the energy balance in closed transplants production system (CTPS) for the production of high quality transplants. Potato (*Solanum tuberosum* L. cv. *Defima*) plug seedlings were grown for 15 days at air temperature of 20°C, relative humidity of 70%, photoperiod of 16/8 h, and photosynthetic photon flux (PPF) of 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  following 5 days of rooting in CTPS. Electric energy consumption was 46% for lighting, 35% for cooling, 16% for heating, 2% for air circulation, and 1% for humidifying. The electric energy utilization efficiency and the short-wave energy utilization efficiency were 0.5% and 5.4%, respectively. These results suggest that CTPS has the feasibility for the commercial production of potato plug seedlings if the electric energy consumption in CTPS is reduced and the electric energy utilization efficiency is increased.

**Key words :** closed transplants production system, energy balance, electric energy consumption

\*Corresponding author

<sup>1)</sup>본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00391-0)지원으로 수행되었음.

## 서 언

현재 국내에 설치되어 있는 육묘시설은 대부분 개방형 묘생산 시스템(이하 개방형 시스템)으로 자연광을 이용하는 장점을 지니고 있으나, 수요자가 원하는 적기에 일정한 묘소질을 지닌 플러그묘를 생산하여 공급하는 데 어려움을 겪고 있다. 개방형 묘생산 시스템 내의 환경은 변동이 심한 외부 기상조건에 의해서 커다란 영향을 받게된다. 예를 들면, 개방형 시스템 내의 기온을 적정 수준으로 유지하기 위해서 여름철의 냉방과 겨울철의 난방이 요구되나, 냉·난방기의 가동에 투입되는 에너지는 상당한 수준에 이를 것으로 전망된다. 현재 온실과 같은 개방형 묘생산 시스템 내에서 고온기의 급격한 온도 상승과 저온기에 생육 적은 이하로 떨어지는 온도 하강을 방지하고자 차광장치 또는 보온장치 등의 부대시설이 요구되며, 이들 부대시설의 개폐 작동에 적지 않은 관리노력이 투입되고 있다.

폐쇄형 묘생산 시스템(closed system for transplants production)은 자연광이 투과되지 않도록 단열재로 구성되어 있기 때문에 개방형 묘생산 시스템과 다르게 시스템 내부와 외부 사이의 열, 수분, 가스 등의 전달 또는 교환이 기본적으로 제한된다. 그러므로 폐쇄형 묘생산 시스템에서는 묘생산에 필요한 광원으로서 형광등과 같은 인공광원을 광원으로 사용한다(Kim, 2000). 폐쇄형 시스템은 개방형 묘생산 시스템에 비해 계절 또는 기후 변동에 따른 의존도가 매우 작고, 시장의 수요에 대하여 보다 탄력적으로 대처할 수 있는 장점을 지니고 있기 때문에(Merle and Alan, 1995) 시스템 내의 환경요소를 제어하기가 비교적 용이하다. 그러므로 폐쇄형 시스템을 이용하면 묘소질이 우수한 식물묘의 대량 생산 뿐만 아니라 계획적인 생산이 가능하다.

폐쇄형 시스템 내의 온도, 상대습도, 광량, 광주기, 기류속도 등 물리적 환경 요소를 적정 수준으로 제어하려면 냉·난방기기, 가습기, 조명기구, 송풍기 등 각

종 설비가 요구된다. 그런데 이들 설비는 전기에너지에 의해서 구동되므로 묘생산에 요구되는 전기에너지 소모량은 폐쇄형 시스템의 경제성을 판단할 수 있는 중요한 기준이 된다. 더구나 폐쇄형 시스템에서 소비되는 전기에너지를 절감하려면 각종설비에 의한 전기에너지 소모량이 분석되어야 한다. 폐쇄형 시스템의 인공광원에 의해서 소비된 전기에너지는 단파복사와 장파복사의 형태로 변환되어 식물체에 조사되며, 그 일부는 시스템 내의 열원으로 기여한다. 또한 광원으로부터 복사 에너지의 일부는 묘의 광합성 작용에 의해서 화학에너지로 변환되고, 나머지는 시스템 내의 열원으로 작용할 것이다. 또한 냉·난방기기, 가습기 및 송풍기에 의해서 소비된 전기에너지의 일부는 시스템 내의 열원으로 작용할 것이다.

이제까지 인공광을 이용한 접목묘의 활착촉진 시스템에서 수탁 접목묘의 활착과정에 대한 소비전력 및 전력요금에 분석된 바 있으나(Kim et al., 2002), 폐쇄형 시스템에 대한 소요에너지 분석은 최근에 시도되고 있다(Kim et al., 2003; Ohyama et al., 2000). 본 연구의 목적은 감자 플러그묘를 생산하기 위한 폐쇄형 시스템을 대상으로 하여 조명기구, 컴프레서, 가열기, 가습기, 송풍기 등의 전기에너지 소모량을 분석하고, 소모된 전기에너지에 기초하여 소비에 따른 시스템 내의 에너지 수지를 분석하는 데 있다.

## 재료 및 방법

### 1. 폐쇄형 묘생산 시스템의 제원 및 시스템 내의 환경요소 측정

본 연구의 시작품으로 제작된 폐쇄형 시스템은 광원부, 육묘용 선반, 시스템 제어부, 기류속도 제어부 및 공기조화부 등으로 구성된다. 폐쇄형 시스템의 내부 크기는 3400(W)×3200(D)×2500(H)이며, 벽체로서 폴리우레탄(열전도계수 0.067 kJ·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>)을 단열재로 충전한 두께 100 mm의 강판을 사용하였다. 시스템 내부에는 크기가 3100(W)×580(D)×2400(H)인 다단식 선반을 2조 설치하였다. 인공광원으로서 3파장 형광등(DULUX55W/21-840, OSRAM)을 사용하였고, 조명효율을 높이기 위해 육묘용 선반의 각단 상부에 반사판을 설치하였다. 폐쇄형 시스템내의 광합성효율광양자속(photosynthetic photon flux, PPF)은 육묘용

선반의 각 단에서 최고 500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>의 광량을 확보할 수 있다(김 등, 2002).

폐쇄형 시스템내의 기온, 상대습도, 광주기를 제어하고자 PID 제어기(UP750, Yokogawa)를 사용하였다. 또한 상대습도를 조절하기 위해서 2대의 초음파 가습기(HU-420, OHSUNG Co., Ltd)를 설치하였다. 가습기의 최대 분무량은 20 L·h<sup>-1</sup>이며, 소비전력은 150 W이다. 난방에 사용된 가열기의 소비전력은 6 kW이며, 시스템 외부에는 3 RT의 냉동능력을 갖는 공조용 컴프레서(AWG5519EXN, Tecumseh)를 설치하였다. 이밖에 시스템내의 기류속도를 일정하게 제어하기 위해 가변전압 가변주파수 방식의 인버터(Starvert-iG, LG Industrial System co., Ltd)를 설치하였다. 폐쇄형 시스템 내외의 기온과 상대습도를 측정하고자 각각 copper-constantan 열전대, 박막식 습도센서(CHS-UGS, TDK)를 설치하였고, 인공광원의 PPF는 광량자센서(LI-190SA, LI-COR)를 사용하여 측정하였다.

### 2. 에너지 수지

식 (1)과 같이 조명기구에 의해서 소비된 전기에너지는 조명기구로부터 조사된 단파복사 에너지, 장파복사 에너지 및 조명기구의 발열량의 합과 같다(Fig. 1). 이때 조명기구에 의해서 조사된 복사에너지의 일부가 육묘용 베드 또는 벽면에 흡수되어 열에너지로 변환되나, 본 연구에서는 보다 간단한 에너지 수지를 제시하고자 변환된 열에너지가 조명기구의 발열에너지에 포함되는 것으로 가정하였다(Ohyama et al., 2000).

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

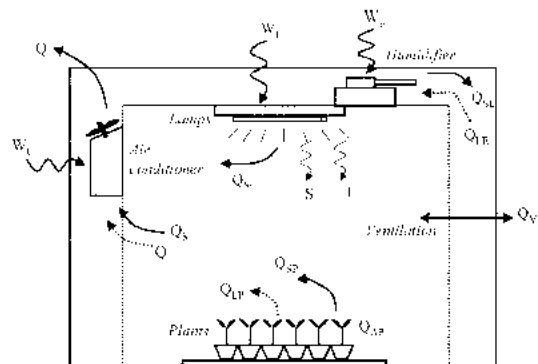


Fig. 1. Variables concerning the energy balance in the closed transplants production system.

여기에서  $W_L$  : 조명기구에 의해서 소비된 전기에너지( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $S$  : 조명기구로부터 조사된 단파복사 에너지( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $L$  : 조명기구로부터 조사된 장파복사 에너지( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{SL}$  : 조명기구의 발열량( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )이다.

단파복사와 장파복사 에너지는 식물체와 주변공기 사이의 현열, 식물체의 증산에 의한 증발잠열 및 광합성에 의해 식물체에 고정된 화학에너지의 합과 같다. 한편 본 연구에서 식물체 개체군에 의한 단파복사와 장파복사 에너지의 반사는 무시하였다.

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

여기에서  $Q_{SP}$  : 식물체와 주변공기 사이의 현열에너지( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{LP}$  : 식물체의 증산에 의한 증발잠열( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{AP}$  : 광합성에 의해 식물체에 고정되는 화학에너지( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )이다.

폐쇄형 시스템 내의 가열기, 가습기 및 송풍기와 같은 살내설비가 소모한 전기에너지( $W_E$ ,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )가 모두 열에너지( $Q_{SE}$ ,  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )로 변했다고 가정하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

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

폐쇄형 시스템에서 발생하는 전체 현열은 조명기구의 발열량, 살내설비로부터의 발열량, 식물체와 주변공기 사이의 현열, 환기에 의한 시스템 내부와 외부사이의 현열의 합으로 표시된다. 이 때 가습기에 의해 시스템 내에서 발생한 현열의 일부가 잠열로 변환되므로 폐쇄형 시스템에서 발생하는 현열에 관한 열수지는 다음과 같다.

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

여기에서  $Q_S$  : 폐쇄형 시스템에서 발생하는 전체 현열에너지( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{SL}$  : 조명기구의 발열량( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{SE}$  : 살내설비로부터의 발열량( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{SP}$  : 식물체와 주변 공기 사이의 현열에너지 교환량( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{SV}$  : 환기에 의한 시스템 내부와 외부사이의 현열에너지 교환량( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{LE}$  : 가습기에 의해 시스템내에서 발생한 현열의 일부가 잠열로 변환 에너지( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )이다.

폐쇄형 시스템에서 발생하는 전체 잠열은 가습기로부터 분사되는 가습 공기의 증발잠열, 식물체의 증산에

의한 증발잠열 및 환기에 의한 시스템 내부와 외부사이의 잠열의 합으로 표시된다.

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

여기에서  $Q_L$  : 폐쇄형 시스템에서 발생하는 전체 잠열( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{LE}$  : 가습기로부터 분사되는 가습 공기의 증발잠열( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{IE}$  : 식물체의 증산에 의한 증발잠열( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),  $Q_{LV}$  : 환기에 의한 시스템 내부와 외부사이의 잠열( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )이다.

### 3. 에너지 소비량 측정 및 계산

조명기구, 공조기구, 가열기, 가습기, 송풍기 등 살내설비에 의해서 소비된 전기에너지 즉, 값들은 각각 적산전력계를 이용하여 측정하였다. 조명기구에 의해 식물체 개체군에 조사된 단파복사 에너지는 전천일사계(NP-42, EKO)를 이용하여 측정하였다. 한편 조명기구에 의해 식물체개체군에 조사된 장파복사 에너지는 순방사계(MF-11, EKO)로 측정된 복사 에너지에서 단파복사 에너지를 뺀 값으로서 결정하였다. 따라서 조명기구의 발열량은 식 (1)로부터 계산된다.

식물체의 광합성에 의해 고정된 화학에너지는 측정 기간동안 식물체 개체군의 건물중 증가량과 건물중 1g 당의 화학에너지( $\approx 20 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1} \text{ DW}$ )를 이용하여 결정하였다. 광합성으로 말미암아 증가된 식물체의 화학에너지를 계산하고자 생체중과 건물중을 측정하였다. 이를 위하여 15일의 육묘 기간 동안 5일 간격으로 각 처리당 10주씩 채취하여 전자저울(FA300KV, A&D Co.)을 이용하여 생체중과 건물중을 측정하였다. 건물중은 시료를  $50^\circ\text{C}$ 에서 72시간 동안 건조기(ON-21, JEIO TECH Co.)에 넣어 건조시킨 후 측정하였다. 식물체의 증산에 의한 증발잠열은 플러그트레이로부터의 증발산량과 물의 증발잠열( $\approx 2.4 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ )을 이용하여 구하였다. 그러므로 식물체와 주변 공기와의 현열은 식 (2)에 의해서 결정된다.

환기에 의한 시스템 내부와 외부 사이의 현열과 시스템 내부와 외부사이의 잠열교환은 공기의 밀도( $\approx 1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 비열( $\approx 0.24 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ), 공기의 비체적( $\approx 0.83 \text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 환기회수( $0.125 \text{ d}^{-1}$ ), 물의 증발잠열, 시스템 내부와 외부의 절대습도 등을 이용하여 결정하였다. 가습기에 의한 가습으로 말미암아 시스템 내에서 발생한 현열의 일부가 잠열로 변환된 값은 가습

량과 물의 증발잠열을 이용하여 결정하였다. 상기 과정에 의해서 결정된 현열과 잠열을 재배면적으로 나눈 단위면적당 현열과 잠열을 에너지수지에 사용하였다.

본 연구에서는 폐쇄형 시스템에 공급된 전체 전기에너지에 대해서 광합성에 의해 고정된 식물체의 화학에너지의 비율을 전기에너지 이용효율( $E_e$ )로 정의하였다. 또한 시스템에 가해진 단파복사 에너지에 대한 광합성에 의해 고정된 식물체의 화학에너지 비율을 단파에너지 이용효율( $E_s$ )로 정의하였다.

#### 4. 공시 품종 및 실험 조건

본 실험에 사용된 공시재료는 조직 배양된 감자 (*Solanum tuberosum* L. cv. *Dejima*)묘로서 Kim et al. (2002)이 개발한 폐쇄형 시스템에서 온도 20°C, 상대습도 70%, 광주기 16/8 h, PPF 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 키워 플러그트레이에 옮겨 심은 후 경삽에 의한 삼수증식법으로 증식되었다. 50공 플러그트레이에 경삽된 감자묘는 실험 후 최초 24시간의 암조건을 거쳐 2일째부터 16/8 h의 광주기 하에서 4일간 발근과정을 거쳤다. 이 때 기온, 상대습도, PPF는 각각 20°C, 90%, 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 조절되었다. 발근후 15일간 실험을 수행하면서, 실험기간 동안 폐쇄형 시스템 내의 온도, 상대습도, 광주기 및 PPF는 각각 20°C, 70%, 16/8 h, 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 조절하였다.

#### 결과 및 고찰

15일간의 실험기간에 조명기구에 의한 전력소모가 1,531 kWh로 나타났고, 다음으로 컴프레서 1,188 kWh, 가열기 545 kWh, 송풍기 76 kWh, 가습기 48 kWh의 순서로 나타났다. 본 연구에서 인공광원에 의한 전력소모가 전체 전기에너지 소비량의 46%를 차지하면서 가장 높게 나타났다. 형광등을 이용한 인공광형 식물공장에서 소비된 전체 전기에너지 가운데 공조기구가 소비한 전기에너지 비율은 동계와 하계에 각각 0.3, 0.5로 보고되었다(Tanimura and Ikeda, 1993; Ikeda et al., 1992). Hirosawa et al.(1991)에 의하면 단열재로 구성된 인공광형 식물공장에서 소비된 전기에너지 가운데 공조기구가 소비한 전기에너지가 차지하는 비율은 상기의 연구 결과(Tanimura and Ikeda, 1993; Ikeda et al., 1992)에 비해서 1/2 이하로 낮게

나타났다. Ohyama et al.(2000)은 고구마묘를 생산하기 위한 폐쇄형 시스템에서 전기에너지 소비량 가운데 공조기구가 소비한 전기에너지 비율을 0.16으로 제시하였다. 폐쇄형 시스템 내에서 인공광원에 의한 발열, 실내 설비가 소모한 전기에너지 가운데 열에너지로 변환된 양은 폐쇄형 시스템의 냉방 부하를 증가시키는 요인에 해당하므로 이들을 절감시키기 위한 노력이 요구된다. 본 연구에서 제작된 폐쇄형 시스템의 체적은 27.2  $\text{m}^3$ 으로서 Ohyama et al.(2000)가 분석한 시스템의 체적 4.6  $\text{m}^3$ 에 비해서 약 6배에 이른다. 또한 시스템내의 기온과 상대습도를 정확하게 조절하고자 냉방시스템을 연속으로 가동하면서 가열기를 단속하는 제어하는 방식을 적용하였기에 컴프레서의 전기에너지 소모가 높게 나타났다. 그 결과 전체에너지소비량에 대해서 컴프레서와 가열기로 구성된 공조기구가 소비한 전기에너지의 비율은 0.51로 높게 나타났다. 향후 공조기구의 전기에너지를 절감시키고 성능계수를 향상시키려면 폐쇄형시스템내의 기온과 상대습도가 제어 목표를 벗어나지 않는 범위에서 소요 냉방능력에 해당하는 1대의 컴프레서를 단속으로 제어하거나 또는 소요 냉방능력의 50%에 해당하는 컴프레서를 2대 설치하여 1대는 연속으로 작동하고 나머지 1대를 단속으로 작동하여 제어하는 등 컴프레서가 소모하는 전기 에너지를 작게 제어 방식이 검토되어야 할 것이다. 본 연구에서는 광원과 육묘용 플러그트레이와의 거리를 조절하는 방식으로 플러그트레이 표면에서의 PPF를 조절하였는데, 향후 광원과의 적정거리에 따라 사용되는 램프수를 조절하면서 근접조명을 실시하고 조명시스템의 반사효율을 높일 경우 묘생산 시스템의 조명기구에서 소비되는 전기에너지를 크게 절감할 수 있을 것으로 판단된다(Kim and Lee, 1998; Kim et al., 2002). 한편, 송풍기와 가습기가 소비하는 전기에너지는 각각 전체 에너지의 2%, 1%에 불과하여 폐쇄형 스템의 전체 에너지 소비량에 비해 매우 작게 나타났다.

본 연구에서 조명기구가 소비한 1일 평균 전기에너지는 47.8  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 나타났다. 또한 폐쇄형 시스템의 에너지 수지에 따르면 조명기구로부터 조사된 1일 평균 전기에너지 가운데 식물체에 조사된 단파복사 에너지, 장파복사 에너지 및 조명기구의 발열량은 각각 10.9  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , 11.4  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ , 20.7  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 나타났다(Fig. 2). 그러므로 조명기구가 소비한 전기에너지 가운

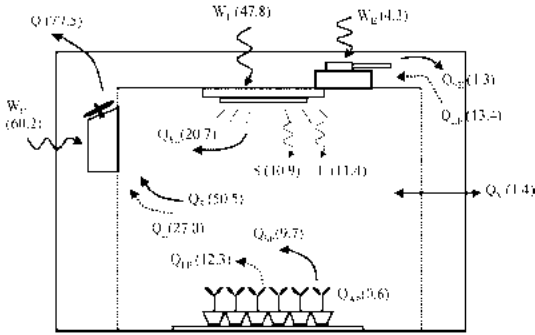


Fig. 2. Energy balance in the closed transplants production system (unit: MJ·m<sup>-2</sup>).

데 조명기구로부터 조사된 단파복사 에너지, 장파복사 에너지 및 조명기구의 발열량을 제외한 4.8 MJ·m<sup>-2</sup>은 폐쇄형 시스템 외부에 설치된 안정기에 의해서 소비된 전기에너지로서, 조명에 투입된 전체 에너지의 약 10%를 차지하였다. 안정기가 소비하는 전기에너지는 대부분 열에너지로 변환되는 바, 안정기를 폐쇄형 시스템 내부에 설치하면 시스템의 냉방부하가 증가한다. 따라서 시스템의 냉방부하 경감을 위해서 안정기를 시스템 외부에 설치하는 것이 바람직하다.

식물체와 주변공기 사이의 현열 및 잠열교환, 광합성에 의해 고정된 식물체의 화학에너지는 각각 9.7 MJ·m<sup>-2</sup>, 12.3 MJ·m<sup>-2</sup>, 0.6 MJ·m<sup>-2</sup>이었다. 그러므로 식 (3)과 식 (4)에 의해서 계산된 1일 평균 전체 현열과 전체 잠열은 각각 50.5 MJ·m<sup>-2</sup>, 27.0 MJ·m<sup>-2</sup>이었다. 또한 폐쇄형 시스템에 가해진 에너지와 단파에너지에 대한 식물체의 광합성에 의해 고정된 화학에너지와의 비율을 나타내는 전기에너지 이용효율과 단파복사 에너지 이용효율은 각각 0.005, 0.054로 나타났다. 본 연구에서 나타난 묘생산 시스템의 전기에너지 이용효율은 Ohyama et al.(2000)가 제시한 전기에너지 이용효율 0.006과 유사한 것이다. 폐쇄형 시스템의 전기에너지 이용효율을 높이려면 시스템의 전기에너지 이용 형태를 개선하여야 한다. 이를 위해서 첫째, 발광효율(조명기구가 소비하는 전기에너지를 광합성유효복사 영역의 복사에너지로 변환하는 효율)을 향상시켜야 한다. 둘째, 조명율(형광등에서 발광된 광양자수에 대해서 식물체에 조사된 광양자수의 비율)을 높여야 한다. 셋째, 공조기구의 성능계수를 높여야 한다. 즉, 시스템내의 에너지를 외부로 배출할 때 소비되는 전기에너지를 절감시켜야 한다. 넷째, 식물체 생육에 적합하도록 시

스템 내의 환경을 조절해야 한다. 고구마묘를 생산하는 폐쇄형 묘생산 시스템에서 단파복사 에너지 이용효율은 0.06정도로 알려져 있다(Ohyama et al., 2000). 형광등에서 발광하는 파장의 대부분은 광합성유효복사 영역에 해당한다. 그러므로 단파복사 에너지 이용효율은 조명기구로부터의 광합성유효복사에 대하여 식물체의 광합성에 의해서 고정된 화학에너지의 비율, 즉 광합성유효복사 이용효율과 거의 같은 값을 갖는다. Bugbee and Salisbury(1988)는 적산 PPF가 서로 다른 조건에서 밀을 재배한 실험 결과에서 0.04~0.11의 광합성유효복사 이용효율을 제시하였다. 에너지 이용효율 측면에서 상기 결과가 본 연구결과에 비해서 에너지 이용효율이 높게 나타난 것은 약 8배에 이르는 높은 재식밀도, 재배품종에 따른 수광능력 및 생육일수에 따른 식물체 군락의 발달상태 차이에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구에서 50공의 플러그트레이를 사용하여 감자묘를 생산하였는 바 향후 폐쇄형 시스템의 실용화를 목표로 묘소질이 저하되지 않는 범위에서 128~200공의 플러그트레이를 사용하는 것과 같이 재식밀도를 식물체를 생산할 경우 단파복사 에너지 이용효율은 증가할 것이다.

일반적으로 자연광 조건에서 식물체의 표면에서 이루어지는 연직 방향의 장파복사가 하향 장파복사에 비해서 크다. 그러나 본 연구에서와 같이 인공광원으로 점등되었을 때에는 광원의 온도가 높기 때문에 식물체의 수평면을 기준으로 하향 장파복사가 상향 장파복사에 비해서 크다. 더구나 식물체의 엽은 또는 식물체 부근의 기온은 식물체 개체군 위의 기온보다 높게 나타날 수 있다(Kim et al. 1996). 본 연구에서는 폐쇄형 시스템내의 기온을 20°C로 설정하였다. 근접조명하에서 식물체의 생육에 적합한 기온은 종래의 보고와 다를 수 있다. 적정 생육 조건에서 식물체를 생산하면 폐쇄형 묘생산 시스템의 전기에너지 이용효율은 향상될 것이다. 그러므로 본 연구에서와 같이 인공광을 이용하여 근접조명이 이루어지는 조건에서 식물체의 적정 생육 기온이 구명되어야 할 것이다.

### 적 요

본 연구는 감자 플러그묘를 생산하기 위하여 시각품으로 제작된 폐쇄형 묘생산 시스템내의 전기에너지 소

모를 분석하고, 에너지 수지를 구명하고자 수행되었다. 기온 20°C, 상대습도 90%, 광주기 16/8 h, PPF 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 조건 하에서 5일 동안 발근과정을 거친 감자 경삽묘는 상대습도와 PPF를 각각 70%, 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 조절한 가운데 15일간 육묘되었다. 폐쇄형 묘생산 시스템내의 전기에너지 소비는 인공광원 46%, 컴프레서 35%, 가열기 16%, 송풍기 2%, 가습기 1%로 나타났다. 전기에너지 이용효율과 단위복사 에너지 이용효율은 각각 0.005과 0.054로 나타났다. 향후 폐쇄형 시스템에서의 전기에너지 소모량을 절감시키면서 에너지 이용효율을 증대시키는 방안이 모색된다면 감자 플러그묘 생산을 위한 폐쇄형 시스템의 실용성은 더욱 높아질 것이다.

**주제어** : 폐쇄형 시스템, 에너지 수지, 전기에너지 소모량

## 인용문헌

1. Bughee, B.G. and F.B. Salisbury. 1988. Exploring the limits of crop production I. Photosynthetic efficiency of wheat in high irradiance environments. *Plant Physiol.* 88:869-878.
2. Hirose, Y., F. Takagi, and T. Takakura. 1991. Analysis of electric energy consumption of a plant factory. ASAE Paper No. 913060.
3. Ikeda, A., Y. Tanimura, K. Esaki, Y. Kawai, S. Nakayama, and K. Iwao. 1992. Development of plant factory using fluorescent lamps -Reduction of lighting power consumption by close illumination-. *J. of SHITA* 3(2):111-123 (in Japanese).
4. Kim, J.K., Y.H. Kim, M.G. Lee, Y.H. Choi, and S.H. Lee. 2003. Analysis of electric energy consumption in closed transplant production system as affected by photoperiod and relative humidity. *Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery* 8(1):145-150 (in Korean).
5. Kim, Y.H. 2000. Application of biotechnology in the field of agricultural machinery engineering -Development of closed system for transplant production-. *J. of the Korean Society for Agricultural Machinery* 25(4): 311-326 (in Korean).
6. Kim, Y.H. and C.H. Lee. 1998. Light intensity and spectral characteristics of fluorescent lamps as artificial light source for close illumination in transplant production factory. *J. of the Korean Society for Agricultural Machinery* 23(6):591-598 (in Korean).
7. Kim, Y.H., J.K. Kim, and S.H. Lee. 2002. Analysis of electric energy consumption and its cost in graft-taking of grafted seedlings. *Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery* 7(1):204-209 (in Korean).
8. Kim, Y.H., J.K. Kim, S.H. Lee, Y.H. Choi, and M.G. Lee. 2002. Distribution of photosynthetic photon flux as affected by arrangements of lamps and vertical distance apart from fluorescent lamps. *Proceedings of the Korean Society for Bio-Environment Control* 11(1): 125-130 (in Korean).
9. Kim, Y.H., J.K. Kim, S.H. Lee, Y.H. Choi, M.G. Lee, and H.J. Kim. 2002. Production of potato transplants under controlled environment. ASAE Paper No. 024114.
10. Merle H and J. Alan. 1995. Protected Agriculture -A global review. The World Bank.
11. Ohyama, K., K. Yoshinaga, and T. Kozai. Energy and mass balance of a closed-type transplant production system (Part I) -Energy balance-. *J. of SHITA* 12(3): 160-167 (in Japanese).
12. Tanimura, Y. and A. Ikeda. 1993. Lighting design of plant cultivation system using fluorescent lamps. *CELSS* 5(2):7-10 (in Japanese).