

## 물질 및 에너지 수지 분석을 통한 시설채소(오이)의 청정에너지 농업 시스템 구축을 위한 기초 연구

신국식<sup>1</sup> · 김승환 · 오승용 · 이상은<sup>1</sup> · 김창현 · 윤영만\*

국립한경대학교 바이오가스 연구센터, <sup>1</sup>국립한경대학교 기후변화 연구센터

### Study for Clean Energy Farming System by Mass and Energy Balance Analysis in the Controlled Cultivation of Vegetable Crop (Cucumber)

Kook-Sik Shin, Seung-Hwan Kim, Seong-Yong Oh, Sang-En Lee,  
Chang-Hyun Kim, and Young-Man Yoon\*

Biogas Research Center, Hankyong National University, Anseong, 456-749, Republic of Korea

<sup>1</sup>Climate Change Research Center, Hankyong National University, Anseong, 456-749, Republic of Korea

Clean energy farming is the agricultural activity to improve an efficiency of agricultural energy use and to replace fossil fuels. This study was carried out to establish the clean energy farming system in the controlled cultivation of vegetable crop (cucumber) adopting the biogas production facility. In order to design the clean energy farming system, mass and energy balance was analyzed between the controlled cultivation system and the biogas production facility. Net yearly heating energy demands ( $E_{YHED}$ ) of forcing and semi-forcing cultivation types were 48,697 and 13,536 Mcal  $10^3$  in the controlled cultivation of vegetable cucumber. To cover these  $E_{YHED}$ , the pig slurry of 511 and 142  $m^3 10a^{-1}$  (biogas volume of 9,482 and 2,636  $Nm^3 10a^{-1}$ , respectively, as 60% methane content) were needed in forcing and semi-forcing cultivation types. The pig slurry of 511  $m^3 10a^{-1}$  caused N 1,788,  $P_2O_5$  511 kg  $10a^{-1}$  in the forcing cultivation type, and the pig slurry of 142  $m^3 10a^{-1}$  caused N 497,  $P_2O_5$  142 kg  $10a^{-1}$  in the semi-forcing cultivation type. The daily heating energy demand ( $E_{i,DHED}$ ) by the time scale analysis showed the minimum  $E_{i,DHED}$  of 7.7 Mcal  $10a^{-1} day^{-1}$ , the maximum  $E_{i,DHED}$  of 515.1 Mcal  $10a^{-1} day^{-1}$ , and the mean  $E_{i,DHED}$  of 310.2 in the forcing cultivation type. And the minimum  $E_{i,DHED}$ , the maximum  $E_{i,DHED}$ , and the mean  $E_{i,DHED}$  were 5.3, 258.0, and 165.1 Mcal  $10a^{-1} day^{-1}$  in the semi-forcing cultivation type, respectively. Input scale of biogas production facility designed from the mean  $E_{i,DHED}$  were 3.3 and 1.7  $m^3 day^{-1}$  in the forcing and the semi-forcing cultivation type. The maximum  $E_{i,DHED}$  gave the input scale of 5.4 and 2.7  $m^3 day^{-1}$  in the forcing and the semi-forcing cultivation type.

**Key words:** Clean energy farming, Agricultural biomass, Anaerobic digestion, Biogas, Livestock manure

## 서 언

농업기계화, 시설원예작물 재배면적 증가 등으로 우리나라 농업의 에너지 의존성이 증가하여, 농림어업 분야의 에너지 소비량은 1981년 75만 8,000 TOE에서 2008년 286만 TOE로 3.8배 증가하였으며, 면세유 기준 농업용 유류 사용량은 1990년 64만 9,399 톤에서 2008년에 197만 5,412 톤으로 3배가 증가한 것으로 보고 (Kim et al., 2010)되고 있다. 근래 지구온난화로 인한 기후변화에 대응하여 농업분야에

서도 이산화탄소 배출 감축을 위해 노력하고 있는 가운데, 국제 유가 상승으로 인한 농가 경영비 절감 방안으로 청정 에너지 농업에 대한 관심이 증가하고 있다. 청정에너지 농업은 지구온난화에 대비하고, 농업의 친환경성과 지속가능성을 높이는데 있어 에너지 이용 측면을 강조하는 개념으로 농업용 에너지 이용의 효율성을 향상시키고, 신재생에너지로 대체·이용하는 농업이다.

2009년 기준 농업부문에서 사용되는 에너지는 국가 전체 에너지 사용량의 1.8% (4,300천 TOE) 수준이며, 석유류가 79.4%, 전력이 15.4%를 차지하고 신재생에너지는 0.0001% (2,400 TOE)이다. 또한 농업용 에너지의 사용 용도는 시설재배 45.4%, 농기계 19.2%, 건조용 6.4%, 기타 10.0% 이며, 어업용이 10.0%, 농가용이 8.9%로 보고되고 있다 (Park and

접수 : 2012. 2. 18 수리 : 2012. 3. 9

\*연락처 : Phone: +82316705335

E-mail: yyman@hknu.ac.kr

Kim, 2010). 특히, 우리나라 청정에너지 공급 잠재량은 9천 600만 TOE이며, 국내 에너지 총사용량 2억 4천만 TOE의 40%에 달한다. 따라서 농업부문의 에너지 사용량은 430만 TOE로 청정에너지 공급 가능량의 5%를 이용하면 농업부문의 에너지 자립이 가능한 것으로 보고 (Park and Han, 2011)되고 있다.

우리나라에서는 현재 지열, 공기열 히트펌프, 바이오가스 및 목재펠릿 등이 농업부문에서 청정에너지원으로 이용되고 있다. 이들 청정에너지원은 경제성, 생산성, 환경성 등 여러 가지 긍정적인 효과를 동시에 갖추고 있다는 점에서 큰 역할을 할 것으로 기대하고 있다. 이에 농림수산식품부에서는 ‘지열 냉·난방 시설 설치지원 사업’, ‘목재펠릿 난방기 설치 지원 사업’, ‘에너지 절감시설 설치지원 사업’, ‘가축분뇨 에너지자원화 사업’을 통해 농업용 에너지 절감과 대체를 위해 노력하고 있다 (Kim et al., 2009). 농업부문 주요 에너지 소비처인 시설채소작물의 경우 청정에너지 농업과 관련하여 시설의 보온력 향상을 위한 다겹 보온커튼, 보온터널 자동개폐장치, 순환식 수막재배 시스템 등의 기술이 보급되고 있고, 에너지효율 향상을 위한 온풍 난방기 배기열 회수 장치, 열회수형 환기 장치, 고효율 열교환 장치 등의 다양한 기술이 보급되고 있으나 직접적인 농업용 에너지 대체기술은 고체연료 난방기, 지열히트펌프에 한정되어 있는 상황이다.

바이오가스 생산시설은 유기성의 농산 바이오매스로부터 전기, 열로 직접 전환이 가능한 바이오가스라는 청정에너지를 생산한다. 특히, 농산 바이오매스의 처리와 함께 혐기 소화액은 농경지에 액비로 순환·이용이 가능하여 친환경적인 작물생산과 연계가 가능하다는데 매우 큰 장점이 있다 (Hong et al., 2011). 이에 국내에서는 다양한 농산 바이오매스의 바이오가스화를 위한 메탄 잠재량평가 (Kim et al., 2010a; Shin et al., 2011b)에 관한 연구와 실증규모 바이오가스 시설의 운전 사례 (Yoon et al., 2011)가 보고되고 있다. 바이오가스는 메탄을 주성분으로 하는 혼합기체로서 65%의 메탄함량을 가지는 바이오가스는 1 Nm<sup>3</sup>당 5,550 kcal의 저위발열량을 가지며, 순수 메탄의 경우 1 Nm<sup>3</sup>당 8,560 kcal의 저위발열량을 가진다. 따라서 바이오가스 중의 이산화탄소를 분리하여 얻어지는 바이오메탄은 직접적인 화석연료의 대체가 가능하며, 분리된 이산화탄소는 시설채소 작물의 생육 증대를 위한 탄소원으로 재이용이 가능하다. 그러나 청정에너지 생산 개념을 가지는 바이오가스 생산 시설은 2010년 기준 11기에 불과하며 (Ministry of Environment, 2011), 대부분 연구·실증 시설로서 청정에너지원으로서의 활용 사례는 극히 미흡한 상황이다. 또한 우리나라에서는 청정에너지 농업 시스템과 관련하여 바이오가스 생산시설의 기술 조사 및 경영성과 사례분석에 관한 연구결과가 보고 (Yoon et al., 2009; Park and Han, 2011)되고 있으나 기술적인 부분에서의 접근은 극히 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 농산 바이오매스의 바이오가스화 기술을 이

용하여 농업분야 주요 에너지 수요처인 시설채소 단지와 연계하는 청정에너지 농업 시스템을 구축하고, 이를 위해 축성 및 반축성 오이 재배 시설을 대상으로 물질 및 에너지 수지의 분석을 통해 청정에너지 농업 시스템 설계 방안을 검토하였다.

## 재료 및 방법

청정에너지 농업 시스템 본 연구는 시설채소 작물인 오이를 대상으로 청정에너지 농업 시스템 구축을 위한 물질 및 에너지 수지를 파악하였다. 청정에너지 생산시설인 바이오가스 시설과 청정에너지 이용시설인 시설채소 작물재배 시설을 중심으로 Fig. 1과 같이 청정에너지 농업 시스템을 설계하였다. 바이오가스 생산시설의 원료는 현재 우리나라에서 주로 활용하고 있는 양돈슬러리를 주원료로 하였으며, 추가적으로 시설채소 작물 재배과정에서 발생하는 작물잔사를 바이오가스 생산시설의 부원료로 활용하는 체계로 설계하였다. 바이오가스 생산시설에서 생산되는 바이오가스는 직접 시설재배지의 가온용 연료로 활용하고 바이오가스 생산과정에서 발생하는 소화액은 액비로 활용하는 것으로 가정하여 시설채소 작물 청정에너지 농업 시스템의 물질 및 에너지 수지를 파악하고자 하였다.

분석 기준 설정 시설채소 작물 청정에너지 시스템의 물질 및 에너지 수지는 국내 수원 지역의 주요 시설채소 작물인 오이를 대상으로 하였다. 시설 오이의 작부체계는 Jeong and Lee (2010)의 시설채소 농가 실태조사 결과에 기초하여 1년 1작기를 기준으로 하였으며, 작형 (Cropping type)에 따라 시설의 가온 에너지에 큰 차이를 나타내는 점을 고려하여 축성 (Forcing)과 반축성 (Semi-forcing) 재배, 두 개의 유형을 설정하였다 (Table 1). 축성재배는 재배기간 중 동절기 직접가온 기간을 포함하는 재배 유형으로 11월 초순에서 4월 초순 까지 재배하며, 반축성 재배는 동절기 직접가온 기간을 일부 포함하는 재배 유형으로 1월 초순에서 6월 중순

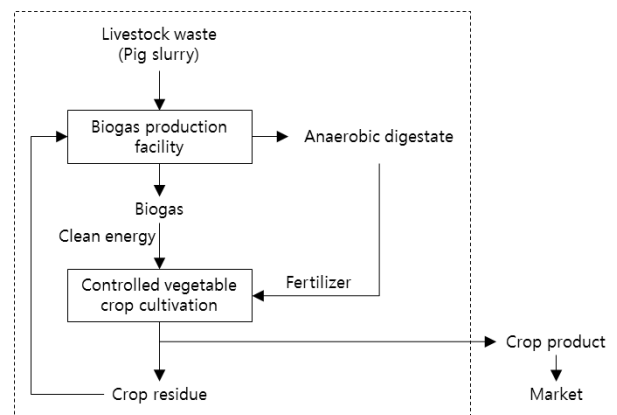


Fig. 1. Design of clean energy farming system (Dotted line indicates the boundary condition for mass and energy balance analysis in this study).

**Table 1. Input data for the analysis of mass and energy balance in the clean energy system of the controlled cultivation.**

| Item                                     | Unit  | Value  | Data source       |
|--|---|--------|-------------------|
| Biogas production facility               |   |        |                   |
| Pig slurry                               |   |        |                   |
| Total solid, TS                          | mg L <sup>-1</sup>                                      | 46,000 | Yoon et al., 2011 |
| Volatile solid, VS                       | mg L <sup>-1</sup>                                      | 32,000 | Yoon et al., 2011 |
| Total nitrogen, TN                       | mg L <sup>-1</sup>                                      | 3,500  | Yoon et al., 2011 |
| Total phosphorus, TP                     | mg L <sup>-1</sup>                                      | 1,000  | Yoon et al., 2011 |
| Performance of digester                  |   |        |                   |
| VS removal                               | % (w w <sup>-1</sup> )                                  | 60     | Yoon et al., 2009 |
| CH <sub>4</sub> yield                    | Nm <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> -VS <sub>removed</sub> | 0.58   | Yoon et al., 2009 |
| CH <sub>4</sub> concentration            | % (mol mol <sup>-1</sup> )                              | 60     | Yoon et al., 2009 |
| Controlled cultivation facility          |   |        |                   |
| Cultivation (planting density)           |   |        |                   |
| Forcing cultivation                      | plants 10a <sup>-1</sup>                                | 2,400  | RDA, 2010         |
| Semi-forcing cultivation                 | plants 10a <sup>-1</sup>                                | 3,000  | RDA, 2010         |
| Byproduct (cucumber)                     |   |        |                   |
| Biomass yield                            |   |        |                   |
| Leaf & stem                              | Mg ha <sup>-1</sup>                                     | 15.9   | Shin et al., 2011 |
| Fallen fruit                             | Mg ha <sup>-1</sup>                                     | 14.6   | Shin et al., 2011 |
| Nitrogen, N                              |   |        |                   |
| Leaf & stem                              | kg ha <sup>-1</sup>                                     | 152.5  | Shin et al., 2011 |
| Fallen fruit                             | kg ha <sup>-1</sup>                                     | 40.9   | Shin et al., 2011 |
| Phosphate, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |   |        |                   |
| Leaf & stem                              | kg ha <sup>-1</sup>                                     | 89.7   | Shin et al., 2011 |
| Fallen fruit                             | kg ha <sup>-1</sup>                                     | 20.5   | Shin et al., 2011 |
| Methane yield                            |   |        |                   |
| Leaf & stem                              | Nm <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>                        | 615.6  | Shin et al., 2011 |
| Fallen fruit                             | Nm <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>                        | 166.9  | Shin et al., 2011 |
| Fertilizer demand                        |   |        |                   |
| Nitrogen, N                              | kg ha <sup>-1</sup>                                     | 240    | RDA, 2010         |
| Phosphate, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | kg ha <sup>-1</sup>                                     | 164    | RDA, 2010         |
| Energy demand                            |   |        |                   |
| Petroleum oil (for warming)              |   |        |                   |
| Forcing cultivation                      | kL ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>                  | 54.401 | Seo, 2011         |
| Semi-forcing cultivation                 | kL ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup>                  | 15.697 | Seo, 2011         |
| Conversion factors                       |   |        |                   |
| Lower heating value of CH <sub>4</sub>   | kcal Nm <sup>-3</sup>                                   | 8,560  |                   |
| Lower heating value of diesel oil        | kcal L <sup>-1</sup>                                    | 9,050  |                   |

까지 재배하는 것으로 설정하였다. 시설 오이 하우스의 가온은 시설내 온도를 기준으로 하여 시설내 내부온도가 10°C 미만시 시설채소 하우스의 가온을 실시하는 것으로 가정하였다.

바이오가스 생산 시설과 작물재배 시설간의 물질수지는 비료성분인 질소 (N), 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)의 성분량을 기준으로 평가하였으며, 에너지 수지는 바이오가스 생산시설의 경우 메

탄 (CH<sub>4</sub>), 시설채소 가온용 연료는 경유의 열량 (kcal)을 기준으로 평가하였다. 물질 및 에너지 수지 평가를 위한 시설 오이의 잔물잔사 발생단위 (Mg ha<sup>-1</sup>)와 비료성분 및 바이오가스 단위생산량 (kg ha<sup>-1</sup>, Nm<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)은 Shin et al. (2011b)이 보고한 자료에 근거하였으며, 양돈슬러리의 성장과 바이오가스 생산시설의 운전효율은 각각 Yoon et al. (2009, 2011)이 보고한 자료를 근거로 Table 1과 같이 청정에너지

농업시스템의 물질 및 에너지 수지분석 기준을 설정하였다.

물질 및 에너지 수지 분석 본 연구에서는 오이 시설재배 지 10a를 기준 면적으로 하고, 시설채소 재배 시설에서 요구되는 단위면적당 연간 난방에너지 요구량을 산출하였으며, 농산 부산물의 발생량을 기준으로 하여 질소 (N), 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 혐기소화시 전환이 가능한 메탄 생산량 (Nm<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)을 산출하였다. 작물잔사와 양돈슬러리로부터의 메탄생산량은 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$P_i = M_i VS_i R_i B_i \quad (1)$$

- i* : Species of source materials for the anaerobic digestion
- P<sub>i</sub>* : Methane production (Nm<sup>3</sup>)
- M<sub>i</sub>* : Mass of input material (Mg)
- VS<sub>i</sub>* : Volatile solid content (w w<sup>-1</sup>)
- R<sub>i</sub>* : Anaerobic VS removal ratio (w w<sup>-1</sup>)
- B<sub>i</sub>* : Methane yield unit (Nm<sup>3</sup> VS<sub>removed</sub><sup>-1</sup>)

시설재배단지의 에너지 요구량을 충족하기 위해 요구되는 바이오가스의 에너지양 (kcal)으로부터 바이오가스 생산 시설의 용량 계획을 수립하였다. 바이오가스 생산시설의 농산 바이오매스 유입용량 (Mg day<sup>-1</sup>)은 시설채소 단지에서 배출되는 작물잔사와 양돈 슬러리의 성상특성 및 메탄생산퍼텐셜 (Nm<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>-VS<sub>removed</sub>)로 산출하였다. 식 (2)에서 *E<sub>CCSB</sub>*는 시설채소 단지로부터 배출되는 농산부산물 유래 청정에너지 생산량으로 *P<sub>CCSB</sub>* (농산부산물의 메탄생산퍼텐셜)에 메탄의 저위발열량인 8,560 kcal Nm<sup>-3</sup>를 곱하여 산출하였으며, 식 (3)에서 시설 재배지의 연간 순 가온 에너지 요구량 (*E<sub>YHED</sub>*)은 시설재배지 연간 총 가온 에너지 요구량 (*E<sub>CCS</sub>*)에서 농산부산물 유래 청정에너지 생산량 (*E<sub>CCSB</sub>*)을 차감하여 산출하였다. 세부적인 바이오가스시설의 유입용량 설계를 위하여 일간 순 가온 에너지 요구량 (*E<sub>DHED</sub>*)은 식 (4)와 같이 일평균기온의 분포특성을 반영하여 산출하였다.

$$E_{CCSB} = P_{CCSB} \times 8,560 (\text{kcal Nm}^{-3}) \times 1,000 \quad (2)$$

- E<sub>CCSB</sub>* : Clean energy production generated from the byproduct (crop residue) of controlled cultivation system (Mcal 10a<sup>-1</sup>)
- P<sub>CCSB</sub>* : Methane production generated from the byproduct (crop residue) of controlled cultivation system (Nm<sup>3</sup> 10a<sup>-1</sup>)
- 8,560 : Lower heating value of methane (kcal Nm<sup>-3</sup>)
- 1,000 : Unit conversion factor

$$E_{YHED} = E_{CCS} - E_{CCSB} \quad (3)$$

- E<sub>YHED</sub>* : Net yearly heating energy demand of the controlled cultivation system (Mcal 10a<sup>-1</sup>)
- E<sub>CCS</sub>* : Total yearly heating energy demand of the controlled cultivation system (Mcal 10a<sup>-1</sup>)

$$E_{i, DHED} = E_{YHED} \times \frac{10 - T_i}{\sum_{i=1}^n (10 - T_i)} \quad (4)$$

- E<sub>i, DHED</sub>* : Daily heating energy demand of a *i<sub>th</sub>* day after start of heating in the controlled cultivation system (Mcal 10a<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>)
- T<sub>i</sub>* : Daily mean atmospheric temperature during the heating cultivation period (°C)
- i* : Start day number of heating during the controlled cultivation period (-)
- n* : Day number below 10°C of mean atmospheric temperature (-)
- 10 : Standard atmospheric temperature for the heating of controlled cultivation (°C)

## 결과 및 고찰

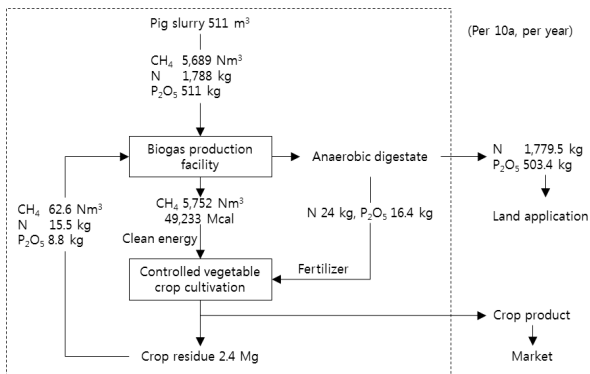
**시설채소 단지 물질 및 에너지 발생량** 시설 오이의 축성 및 반축성 재배에서 단위면적당 발생하는 물질 (비료 성분) 및 에너지 수지는 Table 2와 같다. 시설 오이 재배지에서 요구하는 비료성분량은 질소 (N)와 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)이 각각 24.0, 16.4 kg 10a<sup>-1</sup>이다. 시설채소 오이 잔사 발생량은 축성 재배에서 2.4 Mg 10a<sup>-1</sup>, 반축성 재배에서 3.1 Mg 10a<sup>-1</sup>가 발생하고, 질소 (N)와 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)은 축성과 반축성 재배에서 각각 15.5, 8.8 kg 10a<sup>-1</sup>, 19.3, 11.0 kg 10a<sup>-1</sup>이 발생하였다. 따라서 축성 재배에서 시설채소 오이 잔사에서 발생하는 비료성분은 시설 오이 재배지에서 요구하는 비료성분량의 질소 (N)는 64.6%, 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)은 53.7%에 해당하는 것으로 나타났으며, 반축성 재배에서는 질소 (N)는 80.4%, 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)은 67.1%를 대체할 수 있는 것으로 나타났다. 시설채소 오이 재배지 가온을 위한 총에너지 요구량 (*E<sub>CCS</sub>*)은 축성 재배 49,233 Mcal 10a<sup>-1</sup>, 반축성 재배 14,206 Mcal 10a<sup>-1</sup>로 산출되었다. 시설채소 오이 잔사에서 생산할 수 있는 메탄 (CH<sub>4</sub>)의 양 (*P<sub>CCSB</sub>*)은 축성과 반축성 재배에서 62.6, 78.3 Nm<sup>3</sup> 10a<sup>-1</sup>이었으며, 이를 가온용 열에너지로 전환하는 경우 각각 535.9, 669.8 Mcal 10a<sup>-1</sup>로 나타나 연간 요구되는 시설채소 오이 재배지의 가온용 열에너지양 (*E<sub>CCS</sub>*)의 1.1%

**Table 2. Mass and energy balance in the controlled cultivation system.**

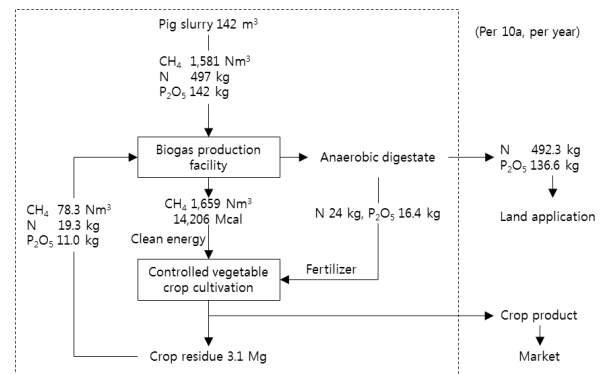
| Item                                     | Unit                                   | Cropping type                     |                          |        |
|--|--|-----------------------------------|--------------------------|--------|
|  |  | Forcing cultivation               | Semi-forcing cultivation |        |
| Waste biomass yield (fresh weight)       | Mg 10a <sup>-1</sup>                   | 2.4                               | 3.1                      |        |
| Mass demand (A)                          | N                                      | 24.0                              | 24.0                     |        |
|  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>          | 16.4                              | 16.4                     |        |
| Mass yield (B)                           | N                                      | 15.5                              | 19.3                     |        |
|  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>          | 8.8                               | 11.0                     |        |
| Mass balance (A-B)                       | N                                      | 8.5                               | 4.7                      |        |
|  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>          | 7.6                               | 5.4                      |        |
| Total energy demand                      | Heating energy (E <sub>CCS</sub> , C)  | Mcal 10a <sup>-1</sup>            | 49,233                   | 14,206 |
| Clean energy yield                       | Methane yield (P <sub>CCSB</sub> )     | Nm <sup>3</sup> 10a <sup>-1</sup> | 62.6                     | 78.3   |
|  | Heating energy (E <sub>CCSB</sub> , D) | Mcal 10a <sup>-1</sup>            | 535.9                    | 669.8  |
| Energy balance (E <sub>YHED</sub> , C-D) |  | Mcal 10a <sup>-1</sup>            | 48,697                   | 13,536 |

**Table 3. Input design factors of the biogas production facility for pig slurry**

| Item  | Unit                          | Cropping type                     |                          |       |
|---|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------|
|   |                               | Forcing cultivation               | Semi-forcing cultivation |       |
| Heating energy (E <sub>YHED</sub> )                     | Mcal 10a <sup>-1</sup>        | 48,697                            | 13,536                   |       |
| Pig slurry factors corresponding to clean energy demand | Methane (P <sub>YHED</sub> )  | Nm <sup>3</sup> 10a <sup>-1</sup> | 5,689                    | 1,581 |
|   | Biogas (CH <sub>4</sub> 60%)  | Nm <sup>3</sup> 10a <sup>-1</sup> | 9,482                    | 2,636 |
|   | Volume                        | m <sup>3</sup> 10a <sup>-1</sup>  | 511                      | 142   |
|   | N                             | Kg 10a <sup>-1</sup>              | 1,788                    | 497   |
|   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Kg 10a <sup>-1</sup>              | 511                      | 142   |



**Fig. 2. Mass and energy balance of the clean energy farming system in the forcing cultivation of the controlled cultivation system.**



**Fig. 3. Mass and energy balance of the clean energy farming system in the semi-forcing cultivation of the controlled cultivation system.**

와 4.7%를 차지하는 것으로 나타났다.

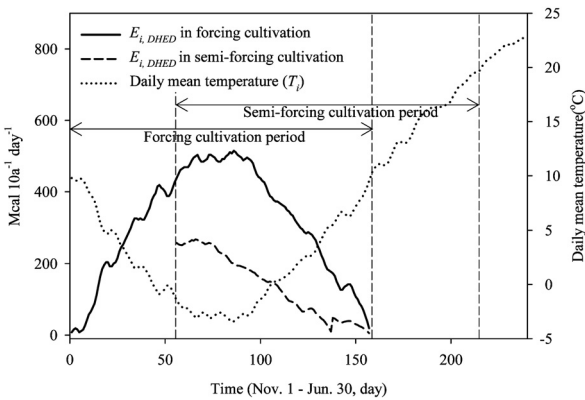
시설 오이 재배지의 연간 가온용 순에너지요구량 (E<sub>YHED</sub>)을 충족시키는 바이오가스량은 60% 메탄함량을 기준으로 할 때, 축성과 반축성 재배에서 각각 9,482, 2,636 Nm<sup>3</sup> 10a<sup>-1</sup>이었으며, 이에 해당하는 바이오가스 생산을 위해서는 축성과 반축성 재배에서 각각 양돈슬러리 511, 142 m<sup>3</sup> 10a<sup>-1</sup>가 요구되는 것으로 나타났다 (Table 3). 또한 시설채소 오이 재배지의 가온에너지를 충당하기 위한 양돈슬러리에서 질소 (N)와 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)은 축성재배에서 1,788, 511 kg 10a<sup>-1</sup>,

반축성 재배에서 497, 142 kg 10a<sup>-1</sup>이었으며, 양돈슬러리에서 발생하는 비료성분의 농지환원을 위해서는 축성 재배의 경우 질소시비 기준 7.5, 인산시비 기준 31.2 ha의 오이재배 면적이 요구되었으며, 반축성 재배의 경우 질소시비 기준 2.1, 인산시비 기준 0.9 ha의 오이재배 면적이 요구되었다. 따라서 양돈슬러리를 이용하는 바이오가스 생산시설과 시설채소 오이의 청정에너지 농업 시스템의 구축을 위해서는 해당 가온시설 외에 비료성분의 적정 순환을 위한 충분한 농경지가 확보되어야 하는 것으로 나타났다 (Fig. 2, Fig. 3).

**바이오가스 생산시설 유입 용량 설계** 시설채소 오이 재배 단지의 가온용 열에너지 요구도는 지역별 기후인자(외기온)에 영향을 받는다. 시설채소 단지는 일반적으로 10월 말부터 간접가온(부직포 보온)을 시작하여 12월과 다음해 1월까지 집적가온(열풍 보일러)하고, 5월초까지 부분적인 간접가온을 실시한다.

수원지역의 30년 평균기온을 기초로 연간 일평균기온 10 °C 미만인 날은 11월 1일부터 다음해 4월 6일까지 연간 157일로 나타났으며, 157일간의 시설채소 오이의 축성 및 반축성 재배 기간 중 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )을 식 (2), (3), (4)를 이용하여 산출하였다 (Fig. 4).

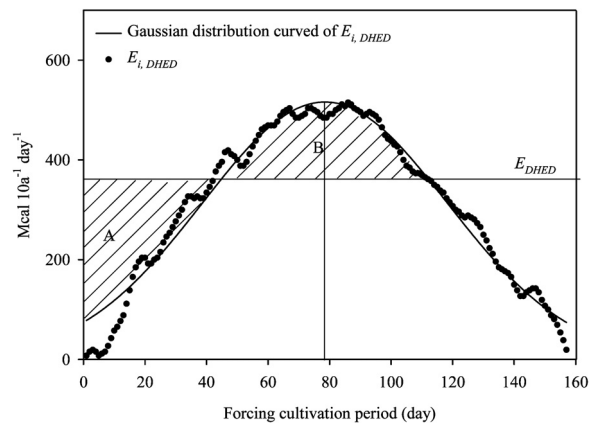
가온기간 중 축성 재배에서 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )은 최소 7.7, 최대 515.1, 평균 310.2 Mcal 10a<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>을 나타냈으며, 표준편차는 154.7 Mcal 10a<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>이었다. 반축성 재배에서 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )은 최소 5.3, 최대 258.0, 평균 165.1 Mcal 10a<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>을 나타냈으며, 표준편차는 77.6 Mcal 10a<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>이었다. 축성 및 반축성 재배에서 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )의 평균치를 활용하여 바이오가스 시설의 양돈슬러리 유입용량을 산출하는 경우 각각 3.3, 1.7 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>이었으며, 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )의 최대값을 기준으로 바이오가스 시설의 유입용량을 설계하는 경우 각각 5.4, 2.7 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>로 나타났다



**Fig. 4.** Daily heating energy demand ( $E_{i,DHED}$ ) during a cultivation period in the controlled cultivation system.

(Table 4). 시설채소 재배단지의 경우 동절기만 가온에너지를 요구하면서 외기온에 따라 큰 일편차를 가지는 특성이 있다. 따라서 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )의 최대값을 기준으로 바이오가스 시설을 설계하는 경우 잉여 바이오가스의 양이 증가하고, 평균치를 기준으로 설계하는 경우 가온기간 중 가온에너지의 부족이 나타날 수 있다. 특히 바이오가스 시설의 용량 증가는 초기시설 투자비를 증가시킨다.

따라서 시설채소 단지와 바이오가스 생산시설을 연계하는 청정에너지 농업 시스템의 구축에서 시설채소 단지의 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )의 충족을 위해서는 동절기 직·간접 가온기간 중 에너지 요구도와 에너지 생산량간의 수치분석을 통한 청정에너지 활용계획의 수립이 요구된다. Figure 5는 가온기간 중 시계열에 따른 에너지 수지를 나타내고 있다. 본 연구에서 시계열에 따른 에너지 수치분석을 통해 시설채소 작물의 청정에너지 농업 시스템 구축 방안을 모색한 결과 합리적인 바이오가스 청정에너지원의 도입을 위해서는 다음의 두가지 방안이 검토될 수 있을 것으로 생각된다. 첫 번째는 기술적인 측면에서 바이오가스 생산시설에서 생산되는 잉여에너지 (A)는 바이오가스 정제·압축·저장 기술을 활용하여 직접가온 기간 중 부족에너지 (B)를 저장·이용하는 방안으로 적정  $E_{DHED}$ 를 설정하여 바이오가스



**Fig. 5.** Energy balance of the daily heating energy demand ( $E_{i,DHED}$ ) distribution curve during a cultivation period in the controlled cultivation system.

**Table 4.** Input scale of pig slurry estimated by the daily heating energy demand of the controlled cultivation system in the biogas production facility.

| $E_{i,DHED}$ | Daily heating energy demand of the controlled cultivation system |                          | Input scale of livestock waste in the biogas production facility |                          |
|--------------|--|--------------------------|--|--------------------------|
|              | Forcing cultivation  | Semi-forcing cultivation | Forcing cultivation  | Semi-forcing cultivation |
|              | ----- Mcal 10a <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup> -----             |                          | ----- m <sup>3</sup> day <sup>-1</sup> -----                     |                          |
| Mean         | 310.2  | 165.1                    | 3.3  | 1.7                      |
| Min.         | 7.7  | 5.3                      | 0.1  | 0.1                      |
| Max.         | 515.1  | 258.0                    | 5.4  | 2.7                      |
| Std. Dev.    | 154.7  | 77.6                     | 1.6  | 0.8                      |

시설의 유입용량을 설계하는 것이고, 두 번째는 이러한 부족에너지의 저장·이용이 불가능한 경우, 직접가온 기간 중 부족에너지 (B)는 기존 화석연료를 활용하거나, 시설의 보온 시설 보완하거나, 또는 다른 청정에너지원의 활용하는 방안이다. 청정에너지시스템의 물질수지 분석 (Fig. 2, Fig. 3)에서 나타난 바와 같이 양돈슬러리를 활용한 바이오가스 생산시설은 최종 소화액의 액비이용을 전제로 하는 경우 상당한 면적의 액비살포지의 확보가 요구되므로 바이오가스 생산시설 용량의 확대는 지역여건에 따라 불리할 수 있다. 또한 하절기의 시설채소 작물재배에서는 농업용 에너지를 요구도가 낮으므로 생산된 잉여 바이오가스 활용 방안의 모색이 필요하다.

## 요 약

본 연구는 바이오가스 생산시설과 연계하는 시설채소 오이의 청정에너지 농업 시스템 구축을 위하여 물질 및 에너지 수지 분석하였으며, 물질 및 에너지 수지 분석을 통해 시설채소 청정에너지 시스템의 도입 방안을 검토하였다. 시설채소 오이 재배지의 연간 가온용 순에너지요구량 ( $E_{YHED}$ )을 충족시키는 바이오가스량은 축성과 반축성 재배에서 각각 9,482, 2,636 Nm<sup>3</sup> 10a<sup>-1</sup> (60% 메탄함량을 기준)이었으며, 바이오가스 생산을 위해서 각각 양돈슬러리 511, 142 m<sup>3</sup> 10a<sup>-1</sup>가 요구되었다. 해당 양돈슬러리에서 발생하는 질소 (N)와 인산 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)은 축성재배에서 1,788, 511 kg 10a<sup>-1</sup>, 반축성 재배에서 497, 142 kg 10a<sup>-1</sup>이었으며, 비료성분의 농지환원을 위해서는 축성 재배의 경우 질소시비 기준 7.5 ha, 반축성 재배의 경우 질소시비 기준 2.1 ha의 오이재배 면적이 요구되었다. 가온기간 중 축성 재배에서 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )은 최소 7.7, 최대 515.1, 평균 310.2 Mcal 10a<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>을 나타냈으며, 반축성 재배에서 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )은 최소 5.3, 최대 258.0, 평균 165.1 Mcal 10a<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>을 나타냈다. 축성 및 반축성 재배에서 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )의 평균치를 기준으로 산출한 바이오가스 생산 시설의 양돈슬러리 유입용량은 각각 3.3, 1.7 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>이었으며, 일일 가온에너지 요구량 ( $E_{i,DHED}$ )의 최대값을 기준으로 한 유입용량은 각각 5.4, 2.7 m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>로 나타났다. 또한 소화액의 처리측면에서 지역특성에 따라 액비이용을 고려한 바이오가스 생산시설 용량설계와 하절기의 잉여 바이오가스 활용 방안의 모색이 필요하였다.

## 사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ007442032012)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## 인 용 문 헌

- Hong, S.G., J.D. Shin, S.I. Kwon, W.k. Park, J.W. Heo, H.S. Bang, Y.M. Yoon, and K.K. Kang. 2011. Comparative environmental effects of digestates application to the rice paddy soil in bioenergy village:field trial. J. of KORRA 19(1):123-130.
- Jeong, E.M. and W.Y. Lee. 2010. A study on energy use of the farmers. Korea Rural Economic Institute, Seoul, Korea.
- Kim, S.H., H.C. Kim, C.H. Kim, and Y.M. Yoon. 2010. The measurement of biochemical methane potential in the several organic waste resources. Korean J. Soil Sci. fert. 43(3):356-362.
- Kim, Y.J., K.H. Park, C.Y. Kang, Y.H. Kim, E.M. Jeong, W.Y. Lee, H.Y. Park, and M.J. Park. 2010. Prospect of demand and supply of energy in the agricultural sector and strategies for introducing clean energy farming system. Korea Rural Economic Institute, Seoul, Korea.
- Kim, Y.J., S.M. Lee, and B.S. Kim. 2009. An analysis on the diffusion of energy-saving facilities and policy suggestions for agriculture. Korea Rural Economic Institute, Seoul, Korea.
- Ministry of Environment. 2011. 2010 Statistics of waste biomass energy. Ministry of Environment, Gwacheon, Korea (In Korean)
- Park, H.T. and H.S. Han. 2011. A study on the type of clean energy utilized in agricultural sector. Korea Rural Economic Institute, Seoul, Korea.
- Park, H.T. and Y.J. Kim. 2010. Status and problems for clean energy utilization in agricultural sector. Korea Rural Economic Institute, Seoul, Korea.
- Rural Development Administration. 2010. One click agricultural technology. (<http://oneclick.rda.go.kr/>).
- Seo, D.G. 2011. Status for energy utilization in the rural and agricultural sector. Rural Development Administration, Suwon, Korea (In Korean).
- Shin, K.S., C.H. Kim, S.E. Lee, and Y.M. Yoon. 2011a. Biochemical methane potential of agricultural byproduct in greenhouse vegetable crops. Korean J. Soil Sci. fert. 44(6):1252-1257.
- Shin, K.S., C.H. Kim, S.E. Lee, and Y.M. Yoon. 2011b. Biochemical methane potential of agricultural waste biomass. Korean J. Soil Sci. fert. 44(5):903-915.
- Yoon, Y.M., C.H. Kim, Y.J. Kim, and H.T. Park. 2009. The economical evaluation of biogas production facility of pig waste. Korean J. Agricultural Management and Policy 36(1):137-157.
- Yoon, Y.M., H.C. Kim, J.S. Yoo, S.H. Kim, S.G. Hong, and C.H. Kim. 2011. The performance of anaerobic co-digester of swine slurry and food waste. Korean J. Soil Sci. fert. 44(1):104-111.