

호기성 액비화 발효열을 가정한 폐열회수시스템 구성 및 활용 연구

임류갑¹, 장재경^{1*}, 강태경¹, 손진관¹, 이동관²

¹국립농업과학원 농업공학부 에너지환경공학과, ²SK 하이닉스 선행환경보전팀

A Study on Composition and Utilization of Waste Heat Recovery System Assuming Aerobic Liquid-composting Fermentation heat

Ryugap Lim¹, Jae Kyung Jang^{1*}, Taegyung Kang¹, Jinkwan Son¹, Donggwan Lee²

¹Division of Energy & Environmental, Department of Agricultural Engineering, NIAS, Jeonju, Republic of Korea
²SK hynix SHE R&D

요약 본 연구에서는 가축분뇨 처리시설의 호기성 액비화 과정에서 발생하는 열을 회수하기 위한 폐열회수 시스템을 고안하여 시스템을 구성하는 요소 장치의 성능을 분석하였다. 또한, 회수된 열의 활용 가능성을 확인하였다. 실험 설정을 위해 가축분뇨 처리시설의 액비 발효조에서 발생하는 발효열을 확인하였다. 호기성 액비화를 위한 발효조의 온도가 균일성을 나타낸 특성과 34.5 ~ 43.9 °C의 범위에서 운영되는 점을 고려하여 실험 온도 수준을 35, 40, 45 °C로 설정하였다. PE 및 STS 파이프로 구성된 복합열교환기는 53.5, 65.6, 74.4 MJ/h 열에너지를 회수하고, 5 RT 용량의 히트펌프는 95.6, 96.1, 98.9 MJ/h 열에너지를 축열 하였으며, 이때 히트펌프의 난방성능계수는 4.53, 4.62, 4.65이었다. 발효조의 온도를 45 °C로 가정한 열교환기의 최대 온수 생산능력을 급탕량 산정 방법으로 비교했을 때 56 360 kcal/day의 에너지 공급량을 확인하였다. 축열조와 연계된 FCU의 온풍 난방능력은 20.8 MJ/h, 에너지 이용효율은 96.1 %였다. FCU의 온풍으로 퇴비를 건조하였을 때 초기함수율 50.5 %에서 건조 후 함수율 45.8 %로 4.7 % 감소함을 확인할 수 있었다.

Abstract In this study, a waste heat recovery system was devised and the performances of components incorporated to recover the heat generated during the processing of aerobic liquid-composting in a livestock manure treatment facility were analyzed. In addition, the availability of recovered heat was confirmed. The heat generated by liquid fermentation in the livestock manure treatment facility was also checked. Experimental temperatures were set at 35, 40, and 45 °C based on considerations of the uniformity of aerobic liquid-composting fermentation tank temperature and its operating range (34.5 ~ 43.9 °C). Recovered heat energies from the combined heat exchanger, which consisted of PE and STS pipes, were 53.5, 65.6, 74.4 MJ/h, The heat pump of capacity 5 RT was heated at 95.6, 96.1, 98.9 MJ/h and the heating COPs of the pump were 4.53, 4.62, and 4.65, respectively. The maximum hot water production capacity of the heat exchanger assuming a fermentation tank temperature of 45 °C confirmed an energy supply of 56 360 kcal/day. The heating capacity of the FCU linked to the heat storage tank was 20.8 MJ/h, and the energy utilization efficiency was 96.1%. When livestock manure was dried using the FCU, it was confirmed that the initial function rate was reduced by 50.5 to 45.8 % after drying.

Keywords : Aerobic fermenter, Heat energy, Heat exchanger, Livestock manure, Waste heat recovery

본 연구는 2021년도 농촌진흥청 국립농업과학원 연구개발사업(과제번호: PJ01427502)의 지원에 의해 이루어진 것임.

*Corresponding Author : Jae Kyung Jang(NAS, RDA)

email : jkjang1052@korea.kr

Received January 7, 2021

Revised March 2, 2021

Accepted April 2, 2021

Published April 30, 2021

1. 서론

국내 축산농가의 규모화와 사양 기술의 발전으로 가축 사육두수는 급증하였으며 가축분뇨 공공처리시설을 통한 연간처리량은 '18년 기준 3,858천톤으로 퇴비 43천톤 액비 151천톤이 농지로 환원 가능한 자원화 처리되었다 [1]. 가축분뇨를 처리하기 위하여 국내에서는 퇴비화와 액비화 그리고 정화방법 등의 3가지 형태의 처리시설이 주로 적용되고 있으며[2-4], 액비화 처리방법에서는 액비화 탱크에 공기를 불어 넣어주는 호기적 방법과 공기를 불어 넣지 않는 비호기적 방식이 사용되고 있고[5], 전국에 약 8,000여기의 액비화 시설이 운용되고 있다[6]. 가축분뇨를 처리하는 과정에서 미생물을 이용한 퇴비, 액비화 방법이 가장 환경친화적이며 노동력과 사회적 비용이 절감되는 방법이면서[7, 8], 계절에 따른 균주를 이용하여 완전 호기성 액비를 생산하여 농지로 환원하거나 방류해서 가축분뇨에 의한 환경부하를 줄일 수 있다[9]. 축산분뇨의 퇴비, 액비화는 가축분뇨를 혐기상태 혹은 호기상태에서 부숙시켜 영양분이 함유된 형태로 만들고 수분함량을 조절하여 적재적소에 사용되고 있다[10]. 미생물에서 생산되는 다양한 효소들을 이용하여 가축분뇨의 발효를 촉진함과 동시에 분뇨에 함유된 다양한 무기물과 유기물을 분해한 뒤 토양에 살포할 경우 토양을 비옥하게 하고 작물의 생산량을 증진시킨다[11]. 가축분뇨의 액비화를 위한 호기 반응조에서는 호기성 미생물에 의한 유기물의 산화분해에서 발생하는 산화반응열과 반응조에서 공급하는 폭기에서 발생하는 유체마찰열 등이 발생하며[12], 이 열에너지는 열교환기 등을 이용하여 회수 및 활용이 가능한 폐열 에너지자원이다[13]. 가축분뇨 처리 폐열은 주로 공공처리시설, 공동처리장, 개별농가로부터 처리를 위한 공정 내에서 버려지고 있는 폐열을 의미한다[14]. 전통적인 분뇨 처리과정에서 미생물 생물학적 발효 시 이용되는 중온성 미생물의 적정 생장온도는 35~55℃로, 온도를 맞추기 위한 가온 및 냉각 장치가 필요하므로 시설비 및 유지관리비가 소요된다는 단점이 있다 [15]. 그러므로 저온 또는 고온의 열에너지를 공정 또는 시스템 내에서 가치가 있는 유효한 에너지로 최대한 회수하고 이용효율을 올리기 위해 열교환기 등 각종 열회수 장치 도입은 필연적이며, 에너지 절감 측면에서 중요한 관점이 되고 있다[16]. 폐열은 열에너지의 온도 수준, 형태, 물질 특성에 따라 다양한 형태와 방법으로 열회수 장치를 도입하여 열을 회수할 수 있다[17]. Lee(2005) 등은 폐 바이오매스로부터 발효에 의한 폐열을 회수하기

위한 발효열 교환기를 제작하여 에너지 회수 장치로서의 가능성을 평가 분석하였다. 다양한 폐 바이오매스의 발효를 통해 발생하는 열을 회수하였으며, 실험을 통해 개발된 열교환기는 온수 공급을 위한 충분한 열을 회수할 수 있는 것으로 확인하였고 일일 3회 운용 시 62,400 kcal/day의 에너지를 공급할 수 있음을 확인 하였다 [18]. Yang(2001) 등은 유기성 폐기물의 유기물 감량과 연료생산 그리고 생물학적 산화과정에서 발생하는 열을 재활용할 수 있는 효율적인 시스템을 개발하기 위한 목적으로 혐기소화성-고온-호기 프로세스를 고안하고 향후 실용화를 위한 기초적인 자료를 얻기 위해 유기물의 처리효율과 처리되는 과정에서 발생하는 열을 혐기성 소화에 적용할 수 있는지 가능성에 대하여 보고하였다[19]. Choi(2017) 등은 호기성 발효조의 산화열을 혐기성소화조의 가온용 에너지로서 이용 가능성을 검토하기 위해 투입, 고액분리, 호기성발효, 혐기성소화, 호기성반응조 공기주입 등의 기능별로 장치를 설계 및 제작하여 실험을 수행하였다. 동절기에도 외부 가온 없이 혐기성 소화조의 온도를 25℃ 이상 유지하는 것이 가능하였으며 계절적인 장애를 극복하여 혐기성 소화조의 운전이 가능하다고 보고하였다[20]. 미생물 반응조에서는 계절에 따라 중온과 고온의 온도가 주기적으로 발생하는데 열 회수 등을 통한 온도 관리로 고온에 의한 균주의 사멸 효과를 방지하여 미생물 발효의 적정온도를 유지할 수 있는 장점이 있다[21]. 따라서 본 연구에서는 가축분뇨 처리시설에서의 미생물에 의한 유기물 제거, 이물질의 퇴적을 방지하기 위해 폭기장치가 설치된 발효조에서 발생하는 열의 온도를 모사한 수조로부터 폐열회수 시스템을 활용해 회수하는데 주목적이 있으며 시스템을 구성하는 요소장치의 성능을 분석하였다. 또한, 회수된 열의 활용 가능성을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 액비 발효조

가축분뇨 공동처리시설 액비 발효조에서 발생하는 온도 수준을 확인하고 실험 조건을 설정하기 위하여 5개 지역의 공동처리시설을 방문하여 현장 조사를 수행하였다. 액비 처리용량, 처리방법, 발효조 형태를 구분하여 조사하였으며 발효조 온도는 저장조로 보내지기 전의 마지막 단계에 온도센서 및 데이터 로거(ALMEMO 289-9, AHLBORN)를 설치하여 '20. 6. 4~8. 27일까지 1시간 저

장 간격으로 설정하여 측정하였다. 액비 발효조의 형태 및 온도 수준은 열교환기의 선택에 있어 중요한 인자가 된다. 온도 측정 결과를 바탕으로 실내 실험에서 액비 발효조를 모사한 수조의 온도 수준을 설정했으며 온도에 따른 회수 가능한 열에너지를 분석하였다.

2.2 폐열회수시스템

본 연구에서 폐열회수시스템은 Fig. 1과 같이 수조 내에 설치된 열교환기, 열교환기와 연결된 버퍼탱크, 버퍼탱크와 연결된 물 대 물 히트펌프, 히트펌프와 연결된 축열조로 구성된 폐열 회수장치부, 버퍼탱크의 열교환기에 연결된 열회수기와 축열조에 연결된 팬코일유닛이 각각 입구쪽과 출구쪽에 연결된 고품 가축분 퇴비 건조기로 구성된 건조부, 액상 가축분뇨 발효조, 버퍼탱크, 축열조에 설치한 온도센서의 측정값을 기반으로 각 유로에 설치한 물펌프 및 히트펌프, 열회수기, 팬코일 유닛을 제어하는 제어부로 구성하였다. 구성도는 Fig. 2와 같으며 자세한 시스템 사양은 Table 1과 같다.



Fig. 1. Experimental waste heat recovery system

발효조 냉각모드는 주로 하절기에 액상 가축분뇨 발효조의 온도가 미생물의 산화반응열과 외기온의 상승작용으로 매우 높아져서 미생물의 활성이 저하되어 가축분뇨 자원화 설비의 효율이 낮아지는 경우 발효조의 온도를 낮추기 위한 온전모드로 발효조 열교환기, 버퍼탱크, 히트펌프, 팬코일 유닛은 가동하고 열회수기는 가동하지 않으며, 이때 발효조에서 공급되는 폐열의 수준이 높아 축열조의 온도를 높게 유지할 수 있으므로 고품 퇴비의 건조에 유리하다. 시스템의 모드별 작동상태는 Table 2와 같다.

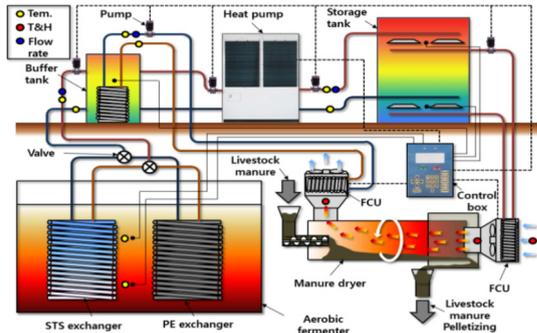


Fig. 2. Schematic of waste heat recovery system

Table 1. Composition and specification of testing apparatus

Component circuit	Element	Specification
Waste coupling circuit	Waste heat exchanger	Material : PE+STS Diameter : 20 mm Length : 120 m Circulation fluid : water
	Circulation pump	Flow rate : ~ 90 ℓ /min Power : 490 W
Refrigerant circuit	Heat pump	Refrigerant : 5 RT Type : Water to water condenser
	Buffer tank	Material : FRP Working fluid/capacity : water / 2 t
Thermal storage circuit	Heat storage tank	Material : FRP Working fluid/capacity : water / 3 t
	Circulation pump	Flow rate : ~ 100 ℓ /min Power : 580 W
Fan coil circuit	Fan coil unit	Heating capacity : 35 kW (at hot water temperature of 80 ℃)
	Circulation pump	Flow rate : ~ 100 ℓ /min Power : 580 W

Table 2. Operating conditions of system

Operating mode	Heat exchanger	Buffer tank	Heat pump	Fan coil unit	Heat recovery
Dry	○	○	○	○	○
Cooling of fermentor	○	○	○	○	×

2.3 폐열회수 실험

액상 가축분뇨 발효조는 처리효율을 높이기 위해 호기성 미생물의 활성화를 위한 적정온도 범위를 유지하여야 하며 히트펌프의 축열조 역시 히트펌프의 종류 및 에너지 이용효율을 고려하여 적정온도 범위를 유지하여야 한다. 대부분의 가축분뇨 처리시설은 미생물이 활성화되는 온도 35 ℃ 영역에서 운영되며, 경우에 따라 55 ℃ 영역

에서 운영된다[20]. 따라서, 실험실 규모의 발효조 반응 온도를 모사하기 위해 본 시스템의 수조에 3 kW 히팅파이프 6개를 설치하고 (35~45) °C까지 5 °C 수준으로 조건을 변경하면서 폐열회수 열량을 측정하였다. 이때 축열조 온도는 45 °C로 설정하였다. 발효조 및 축열조 등 각 설비의 2개소 위치에 온도센서(NTC 10K)를 설치하여 평균값을 계속하고, 제어기에 발효조 및 축열조의 온도 설정(상/하한)을 입력하여 시스템을 구성하는 각 설비의 On-Off PLC 제어가 수행되도록 하였다. 시스템을 순환하는 물의 유량을 측정하기 위해 각 설비의 배관 사이에 체적식 유량계를 설치해 1시간 단위로 측정하였으며, 모든 측정값은 RS485 데이터 통신을 통해 컴퓨터에 자동 저장하였고 히트펌프의 COP를 계산하기 위한 소비전력은 전력량계(CW240, Yokogawa Electric Corp., Japan)를 사용하여 측정하였다. 가축분뇨 폐열회수시스템은 전북 전주시 농생명로에 위치한 국립농업과학원 농업공학부 실험실에 설치하고 실험을 수행하였다. 시스템의 회수 열량과 히트펌프의 효율인 COP는 식(1)과 (2)로 계산하였다.

$$Q_r = m_r \times C_p \times (t_2 - t_1) \quad (1)$$

Where, Q_r : Waste heat recovery (kcal/h)
 m_r : Mass flow rate of water (kg/h)
 C_p : Specific heat (kcal/kg°C)
 t_2 : Mean discharge water temperature (°C)
 t_1 : Mean suction water temperature (°C)

$$COP = \frac{Q_h (kW)}{P (kW)} \quad (2)$$

Where, COP : Coefficient of performance
 Q_h : Heat pump release rate(kW)
 P : Electric power consumption(kW)

2.4 FCU 온풍 성능

가축분뇨 발효조에서 회수한 열을 퇴비 건조 등의 에너지로써 이용 가능성을 확인하기 위해 축열조 온도를 45 °C로 설정하고 축열조에서 FCU로 온수를 순환시키는 물 펌프를 가동하여 온풍 난방능력을 측정하였다. 온풍 성능은 농업기계화촉진법 시행규칙[22]에 따른 전기 온풍난방기 검정방법 중 난방능력 측정 방법을 준용하여 식(3)으로 계산하였다. 평균 풍속 및 평균 토출공기 온도는

시험 관로의 끝부분에 풍량계(DBM610, KIMO Instruments, France)를 설치하여 측정하였다.

$$Q_f = 3600\rho \times A \times V \times C_{p_a} (t_2 - t_1) \quad (3)$$

Where, Q_f : Heating capacity (kcal/h)
 ρ : Air density (kg/m³)
 A : Discharge area (m²)
 V : Mean wind speed (m/s)
 C_{p_a} : Specific heat (kcal/kg°C)
 t_2 : Mean discharge air temperature(°C)
 t_1 : Mean suction air temperature(°C)

2.5 폐열을 활용한 퇴비 건조

폐열회수시스템을 활용해 열을 회수하고 팬코일 유닛을 통해 발생하는 온풍을 활용하기 위해 시스템과 연계된 로터리 킬른 형태의 건조기를 Fig. 3과 같이 제작하였다. 용량은 80 kg/h, 로터리 회전은 1~10 rpm 까지 가변제어가 가능하도록 하였으며, 소비전력은 1.5 kW이다. 제작한 건조기의 회전속도를 1 r/min 설정하고 공동처리시설에서 생산한 가축분 발효퇴비 20 kg을 투입하여 건감율을 측정하였으며 퇴비 수분함량은 3개 샘플을 채취하여 가열감량법으로 측정하였다[23].



Fig. 3. Experimental manure dryer.

3. 결과 및 고찰

3.1 호기성 액비 발효조 온도 변화

조사지역에서 운영되고 있는 액비화 시설은 Table 4와 같이 하루 처리용량은 20~60 ton 까지 조사되었으며 액비화 반응조에는 공기를 주입할 수 있는 폭기장치

Table 4. Aerobic Liquid-composting process and temperture

Regions	Treatment capacity (ton/Day)	Processing method(Day)	Type	Mean temperature (℃)
Jeongeup	60	Storing → Solid/Liquid Separation → Deodorization → Aerobic Fermentation(20) → Curing tank(10)	Closed square	38.2
Iksan	40	Storing→Solid/Liquid Separation → Fluid regulation tank(5)→ Liquid manure fertilization(30) → Curing tank(5)	Closed square	43.9
Hwaseong	30	Storing → Solid/Liquid Separation → Aerobic Fermentation(20) → Curing tank(7)	Open square	39.9
Yongin	40	Storing → Solid/Liquid Separation → Aerobic Fermentation(20)→ Curing tank(10)	Open circular	34.5
Gongju	20	Storing → Solid/Liquid Separation → Fluid regulation tank(5) → Aerobic Fermentation(30) → Curing tank(10)	Open square	38.3

가 설치되어 있었고 형태는 원형, 직사각형, 액비 발효관 리 및 냄새 확산 방지를 위한 지하 밀폐 사각형 시설이 조사되었다. 85일 동안 측정한 액비 발효조의 평균 온도는 Fig. 4와 같이 정읍 38.2 ℃, 익산 43.9 ℃, 화성 39.9 ℃, 용인 34.5 ℃, 공주 38.3 ℃이었다. 이와 같은 결과는 미생물의 적정 생장온도 35~55 ℃ 범위에서 잘 유지되는 것으로 나타났으나 단순 평균 온도만으로 판단하기에는 부족하기에 85일 평균 온도와 일 평균 온도의 평균절대편차를 구하고 균일도 개념으로 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 추세선은 평균절대편차가 0일 때 균일도가 100 %가 되도록 절편을 100으로 설정하여 분석하였고 R² 값은 0.984 ~ 0.996으로 온도의 균일성은 조사지역 모두 높게 나타났다. 이처럼 고온기에도 발효조의 온도가 균일성을 나타낸 특성과 34.5 ~ 43.9 ℃의 범위에서 운영되는 점을 고려하여 실내 실험에서의 온도 수준을 35, 40, 45 ℃로 설정하였다.

3.2 폐열회수량 및 온수 생산능력

축열조 온도를 45 ℃로 설정하고 발효조 온도 수준을 35, 40, 45 ℃ 조건일 때 열교환기, 히트펌프 열량과 축열조 및 발효조의 온도 변화 그래프를 Fig. 4(a), (b), (c)에 각각 나타내고 있으며 축열조 온도가 상승하고 온도차가 비교적 일정한 구간에서 1시간 평균 열량을 산출하였다. 초기에 열을 회수하고 설정 온도까지 축열을 위해 열교환기와 히트펌프가 모두 가동되어 발효조 온도가 떨어지는 경향을 나타냈으며, 축열조 설정 온도까지 열이 전달된 후 히트펌프는 약 30분 휴지, 5분 가동 간격으로 작동하였다. PE 및 STS 파이프로 구성된 열교환기는 온도 수준에 따라 각각 53.5, 65.6, 74.4 MJ/h 열에너지를 회수하고 히트펌프는 95.6, 96.1, 98.9 MJ/h 열에너지를 축열하였다. 액비 발효조의 온도를 최고온도 45 ℃로

가정하였을 때 열교환기 및 히트펌프를 순환하는 물의 유량은 각각 4.139 m³/h, 4.246 m³/h이었다. 이와 같은 성능시험 결과를 근거로 한 최대 온수 생산능력을 인원수에 의한 급탕량 산정방법으로 비교하였다. 보통 공장의 급탕부하 설계를 위한 하루 소요 온수량은 1인당 60 ℃ 온수 20 L를 기준으로 하며, 1 L에 60 kcal를 기준으로 한다[24]. 따라서 10인으로 구성된 가축분뇨 처리시설 공장의 경우 하루 약 200 L의 온수가 필요하며, 12 000 kcal/day가 요구된다. 본 연구에서 수행된 폐열회수시스템의 열교환기 최대 공급 가능 열량 74.4 MJ/h는 축열을 45 ℃로 설정하였을 때 성능이므로 60 ℃ 온수와 온도 차 15 ℃, 물의 유량 4.139 m³/h로 계산한 열량 15.5 MJ/h를 제외하고 환산하였을 때 14 090 kcal/h이다. 실험을 위해 Fig. 4(C)와 같이 45 ℃의 온수를 축열 후 약 4시간 동안 유지 시킨 점을 고려하였을 때 56 360 kcal/day로 10인 공장 약 4일의 급탕부하를 감당할 수 있으며 Table 4와 같이 히트펌프의 축열량을 감안하면 지속적으로 안정적인 운용이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 액비 발효조에서 열을 회수할 때 발효조 내 유기물 농도가 높으면 점도가 높아지며 분해효율은 낮아지고 점도가 높은 발효조에는 층이 생기며 이로 인하여 미생물 활동이 적어져 부숙에 의한 발효가 낮아지므로[25] 시스템 적용에 있어 액비 점도 변화에 대한 대응이 필요하다. 또한, 열을 회수하여 발효조의 온도가 낮게 유지되면 호기성 미생물의 활동은 약해지고 그 때문에 유기물 분해 속도가 지연되어 액비화에 오랜 시간이 소요되는 단점도 있다. 수조의 온도를 35, 40, 45 ℃로 설정하여 시스템을 구성하는 열교환기에서 폐열을 회수하고 45 ℃까지 축열을 위한 히트펌프의 축열성능 및 성능계수를 Table 4에 나타내었다. 수조의 온도 35 ℃일 때 히트펌프 입·출구의 평균 온도 차 5.3 ℃, 물의 유량 4.314 m³/h, 40 ℃일

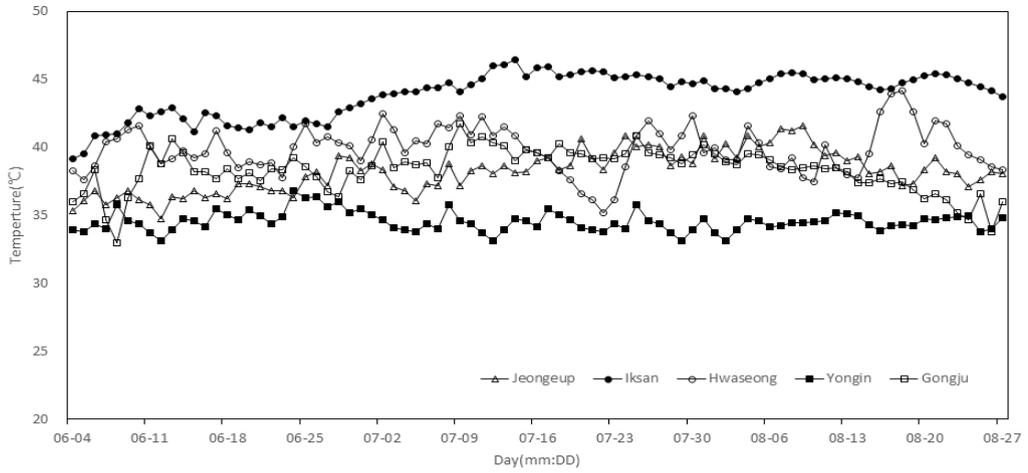


Fig. 4. Temperature changing of aerobic reactor

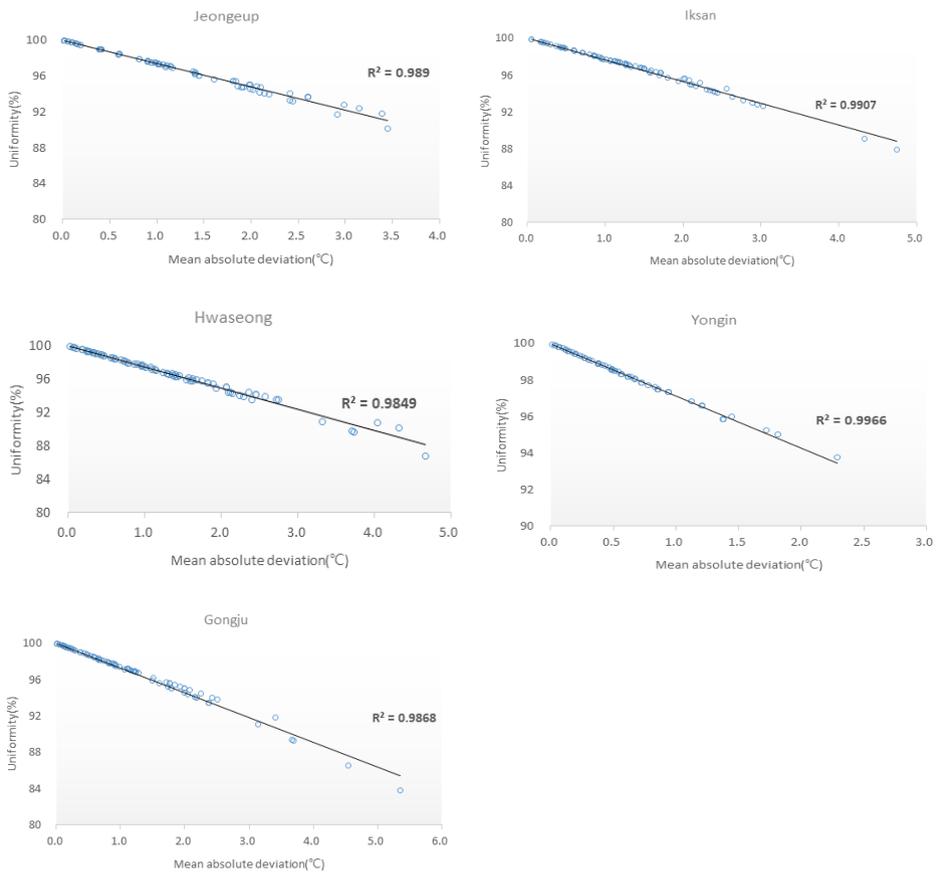


Fig. 5. Relation between the uniformity and the mean absolute deviation

때 온도 차 5.44 ℃, 물의 유량 4.224 m³/h, 45 ℃일 때 온도 차 5.57 ℃, 물의 유량 4.246 m³/h로 나타났다. 히트펌프의 성능계수를 산출하기 위해 측정된 소비전력은 각각 5.863, 5.772, 5.903 kW이었다. 히트펌프의 난방 성능과 소비전력을 식(2)로 계산하였을 때 성능계수는 4.53, 4.62, 4.65였으며 이는 환경부 인증기준에서 요구하는 밀폐형 히트펌프 시스템의 성능계수 3.45 보다 모두 높아 양호한 수준이었다[26].

Table 5. Heat release rate and COP of heat pump

Thermal storage tank setting(℃)	Fermentor tank setting(℃)	Heat release rate (MJ/h)	COP
45	35	95.6	4.53
45	40	96.1	4.62
45	45	98.9	4.65

3.3 FCU 온풍 난방능력

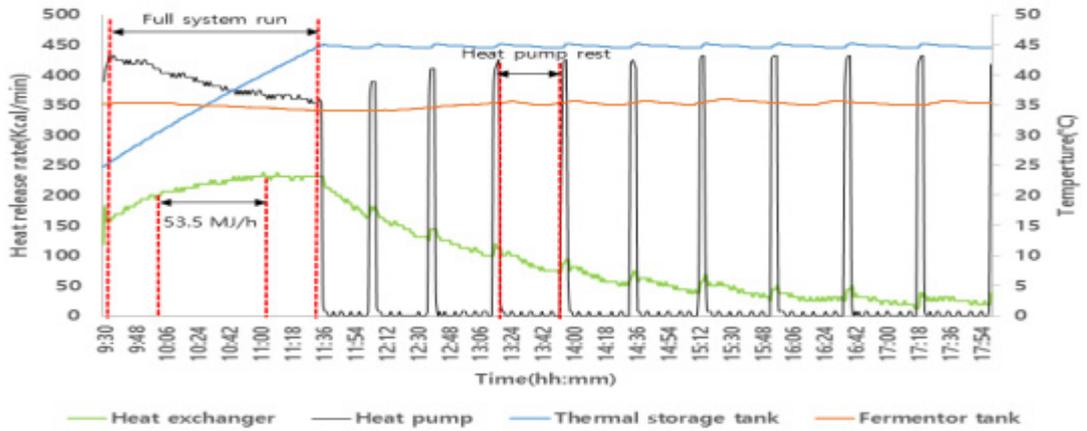
액비 발효조를 모사한 수조의 온도가 45 ℃일 때 폐열 회수시스템을 활용해 목표 온도 45 ℃로 물을 축열하고 물-공기 형식의 FCU에 물을 공급하여 식(3)으로 계산한 결과 온풍 난방능력은 20.8 MJ/h이었다. 시험 관로의 토출 면적은 0.04909 m², 평균 풍속은 6.70 m/s, 평균 토출공기 온도는 41.2 ℃, 평균 흡입공기 온도는 25.5 ℃, 공기밀도는 1.1205 kg/m³로 측정되었으며 1시간 동안 0.111 kW 전력을 소모하였다. 앞선 폐열회수 실험에서 축열을 위한 히트펌프의 열에너지는 1시간 동안 98.9 MJ이었으며, 이때 소비전력은 5.903 kW로 측정되었다. 이와 같이 FCU에 온수를 공급하기 전 축열을 위한 열원은 히트펌프이므로 전력소모량을 에너지 이용효율 계산에 합산하였다. FCU의 온풍 난방능력 20.8 MJ를 환산했을 때 4 971 kcal이며 히트펌프와 FCU 합산 소비전력 6.014 kW를 환산했을 때 5 172 kcal로 온풍 난방능력을 합산 소비전력으로 나누어 계산하였을 때 에너지 이용효율은 96.1 %이었다. 축열조의 목표 온도는 45 ℃로 모두 동일하며 히트펌프의 소비전력은 수조의 온도를 45 ℃로 설정하였을 때 가장 많이 소비되는 것으로 측정되었으며 이때의 물 - 공기 형식 FCU에 대한 에너지 소비효율을 나타내었다. 여기서, 1 kcal는 4.18 kJ, 1 kW는 860 kcal로 환산하여 계산하였다.

3.4 퇴비 수분 변화 및 건조에너지

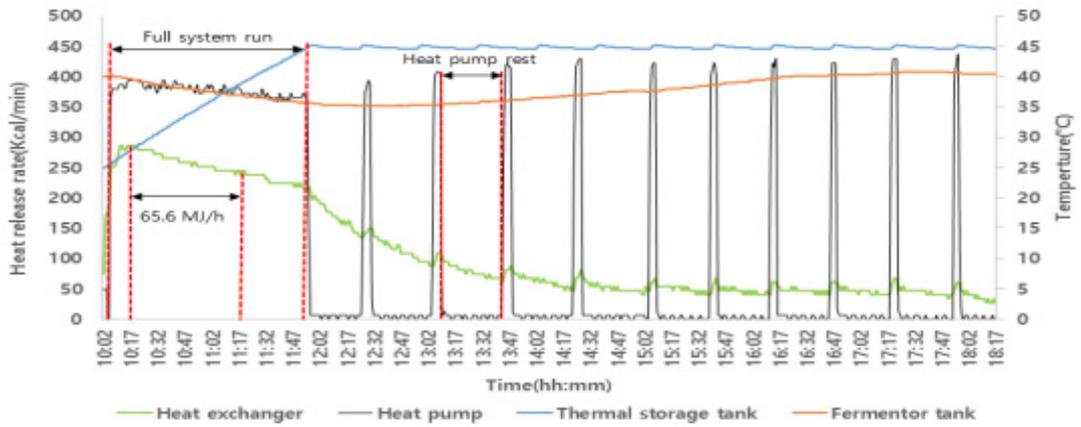
정(2005)은 발효 퇴비의 수분함량을 40 % 내외로 유지할 경우 투입량 대비 95 % 이상의 유용한 펠릿형 퇴비 생산효과를 얻을 수 있고 수분함량이 55 % 내외의 경우에는 펠릿 형태를 이루지 못한다고 하였다[27]. 폐열회수 시스템을 작동해 축열조 온도가 45 ℃에 도달했을 때 FCU에서 발생하는 온풍을 펠릿형 퇴비 성형 적정 수분함량으로 맞추주기 위한 퇴비 건조에 활용하였다. 가축분뇨 공동처리시설에서 생산한 우분 50 %, 돈분 15 %, 계분 15 % 톱밥 20 % 로 구성된 가축분 퇴비 20 kg을 투입해 건조하였을 때 초기함수율 50.5 % 에서 건조 후 함수율 45.8 % 로 4.7 % 감소하였다. 이는 발효 퇴비의 펠릿화 효과가 가장 좋은 원재료 수분함량 40 % 수준에 미치지 못했다. 이에 건조에너지를 함수율 기준으로 산출하고 퇴비 수분함량을 40 %로 맞추기 위한 추가 요구 에너지를 계산하였다. 건조에너지는 수분 가운데너지와 기화에너지의 합으로 나타낼 수 있다. 가축분 퇴비 20 kg에 대한 초기함수율 50.5 % 수분 질량 10.1 kg이며 건조 후 함수율 45.8 %는 9.16 kg임을 알 수 있다. 물의 증발열은 이론적으로 약 539 kcal/kg이며 수분 질량 0.94 kg을 증발시키기 위해 506 kcal를 소모하였고 상온 20 ℃ 기준으로 808 kcal로 총 1 314 kcal의 에너지가 소비되었다. 퇴비 20 kg 기준으로 40 % 함수율을 목표로 했을 때 수분 질량은 8 kg이며 1.16 kg의 수분을 증발시키기 위해 625 kcal의 열량과 가온 열량 640 kcal로 총 1 265 kcal가 추가적으로 필요하다. 그러나 퇴비 재료 중 온도상승 에너지, 건조기 벽체로 손실되는 에너지, 퇴비 분해로 인하여 발생한 에너지 등이 소모되기 때문에 퇴비 재료 중의 수분 1.16 kg을 증발시키기 위하여 1 265 kcal보다 큰 에너지가 필요하다. 따라서, FCU 온풍 토출공기 온도가 41.2 ℃임을 고려하여 완제품 발효 퇴비를 함수율 40 % 이하로 건조 시키려면 단열, 풍량 증가 등 구조를 개선 및 보완해야 할 필요가 있다.

4. 결론

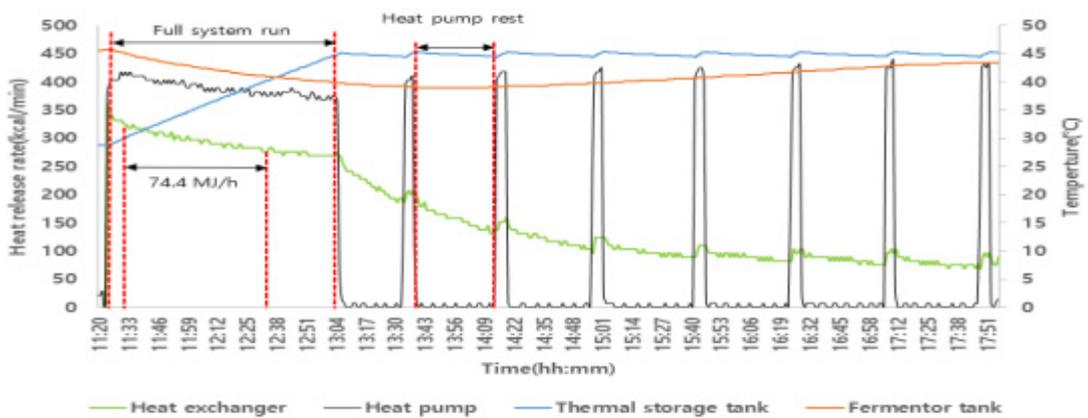
호기성 액비 발효열의 온도 특성을 확인하기 위해 가축분뇨 처리시설의 액비 처리방법 및 온도 변화를 조사하고 발효조 온도를 35, 40, 45 ℃로 가정하여 폐열회수 시스템을 운용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



(a) Thermal storage tank setting 45 °C at Fermentor 35 °C



(b) Thermal storage tank setting 45 °C at Fermentor 40 °C



(c) Thermal storage tank setting 45 °C at Fermentor 45 °C

Fig. 6. Analysis of waste heat recovery system performance by experiments.

- (1) PE 및 STS 파이프를 구성된 열교환기는 53.5, 65.6, 74.4 MJ/h 열에너지를 회수하고, 5 RT 용량의 히트펌프는 95.6, 96.1, 98.9 MJ/h 열에너지를 축열 하였으며, 히트펌프의 난방성능계수는 4.53, 4.62, 4.65이었다. 또한, 열교환기의 최대 온수 생산능력을 급탕량 산정방법으로 비교했을 때 56 360 kcal/day의 에너지 공급량을 확인하였다.
- (2) 축열된 온수를 FCU에 공급하고 온풍을 작동시켰을 때 1시간 동안 0.111 kW 전력을 소모하였으며 온풍 난방능력은 20.8 MJ/h이었다. 히트펌프 전력소모량을 합산하여 에너지 이용효율을 계산하였을 때 96.1 %로 나타났다.
- (3) FCU에서 발생하는 온풍을 펠릿형 퇴비 성형 적정 수분함량으로 맞추기 위한 퇴비 건조에 활용하였을 때 초기함수율 50.5 %에서 건조 후 함수율 45.8 %로 4.7 % 감소하였다. 건조에 투입된 에너지를 수분 질량 기준으로 산출하고 함수율 40 %로 맞추기 위한 추가 요구 에너지를 계산하였을 1 265 kcal의 열량이 추가적으로 필요함을 확인하였다. 현장 적용을 통한 연구의 목표 달성을 위해 폐열회수량과 FCU 방출 열량을 최적으로 맞추고 건조기 습 방출장치 등의 추가적인 보완을 한다면 가축분뇨 폐열을 퇴비 건조에너지로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 본 연구는 가축분뇨 폐열회수 및 활용 분야에 대한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

References

- [1] Ministry of environment(Korea) home page, Status of installation and operation of public treatment facilities for livestock manure, 2019. <http://www.search.me.go.kr>
- [2] P.J. Kim, Y.B. Lee, Y. Lee, H.B. Yun, K.D. Lee, "Evaluation of livestock manure utilization rates as agricultural purpose in developed OECD countries by using nutrient balances", *Korean Journal of Environmental Agriculture*, Vol.27, No.4, pp.337-342, 2008. DOI : <https://doi.org/10.5338/KJEA.2008.27.4.337>
- [3] B.K. Park, J.S. Lee, N.J. Cho, K.Y. Jung, "Effect of liquid pig manure on growth of rice and infiltration water quality", *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol.34, No.3, pp.153-157, 2001.
- [4] W.T. Kim, D.S. Suh, "Importance-Performance Analysis of the Livestock Organic Wastes Recycling Policy", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.19, No.12, pp.523-531, 2018. DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.523>
- [5] B.W. Gu, D.M. Oh, Y.S. Lee, "A Study on Characteristics of Aerobic Liquid-Composting using a Micro Air Diffusion and a Mixer System", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.11, No.4, pp.1354-1360, 2010. DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.4.1354>
- [6] K.H. Jeong, J.K. Kim, M.A. Khan, D.W. Han, J.H. Kwag, "A study on the characteristics of livestock manure treatment facility in Korea", *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, Vol.22, No.4, pp.28-44, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.17137/Korrae.2014.22.4.028>
- [7] D.W. Kim, Y.H. Choi, J.E. Kim, E.S. Cho, H.J. Jung, S.M. Oh, J.D. Kim, J.S. Kim, "Effects of Complex Probiotic Supplementation on Growth Performance, Nutrient Digestibility, Blood Metabolites, Noxious Gas and Fecal Microflora in Weaning Pigs", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.21, No.5, pp.266-273, 2020. DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.5.266>
- [8] J.J. Walsh, J. Rousk, G. Edwards-Jones, D.L. Jones, A.P. Williams, "Fungal and bacterial growth following the application of slurry and anaerobic digestate of livestock manure to temperate pasture soils", *Biology and Fertility of Soils*, Vol.48, No.8, pp.889-897, 2012. DOI : <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0681-6>
- [9] Y. Yao, G. Huang, C. An, X. Chen, P. Zhang, X. Xin, J. Shen, J. Agnew, "Anaerobic digestion of livestock manure in cold regions: Technological advancements and global impacts", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.119, 109494, 2020. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109494>
- [10] K.Y. Jung, N.J. Cho, Y.G. Jeong, "Comparison of liquid composting efficiency using liquid pig manure in different condition", *Korean Journal of Environmental Agriculture*, Vol.17, No.4, pp.301-305, 1998.
- [11] B. Ravindran, S.M. Contreras-Ramos, G. Sekaran, "Changes in earthworm gut associated enzymes and microbial diversity on the treatment of fermented tannery waste using epigeic earthworm *Eudrilus eugeniae*", *Ecological Engineering*, Vol.74, pp.394-401, 2015. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.014>
- [12] T. Itoh, K. Iwabuchi, N. Maemoku, I. Sasaki, K. Taniguro, "A new torrefaction system employing spontaneous self-heating of livestock manure under elevated pressure", *Waste management*, Vol.85, pp.66-72, 2019. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.018>
- [13] K.B. Cantrell, T. Ducey, K.S. Ro, P.G. Hunt, "Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities", *Bioresource technology*, Vol.99, No.17, pp.7941-7953, 2008.

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.061>

[14] K.H. Ahn, H.D. Ryu, Y.S. Kim, "Systematic review on management of livestock wastes for improving water quality", *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol.31, No.5, pp.576-582, 2015.
DOI : <https://doi.org/10.15681/KSWE.2015.31.5.576>

[15] S.Y. Kim, H. Kim, H.J. Choi, "Isolation and characterization of microorganisms for the development of fermentation accelerator of animal manure", *KSSB Journal*, Vol.18, No.6, pp.466-472, 2013.

[16] K.S. Shin, S.H. Kim, S.Y. Oh, S.E. Lee, C.H. Kim, Y.M. Yoon, "Study for Clean Energy Farming System by Mass and Energy Balance Analysis in the Controlled Cultivation of Vegetable Crop (Cucumber)", *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol.45, No.2, pp.280-286, 2012.
DOI : <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.2.280>

[17] D. Słyś, K. Pochwat, D. Czarniecki, "An Analysis of Waste Heat Recovery from Wastewater on Livestock and Agriculture Farms" *Resources*, Vol.9, No.1, p.3, 2020.
DOI : <https://doi.org/10.3390/resources9010003>

[18] C.G. Lee, S.K. Lee, K.B. Lee, S.h. Rhi, I.S. Ryou, "Study on Heat Recovery System using Waste Biomass", *Journal of Energy Engineering*, Vol.14, No.4, pp.248~258, 2005.

[19] J.K. Yang, K.M. Choi, "Treatment of Organic Wastes and Reuse of Bio-energy from the Anaerobic Digestion - Thermophilic Oxidic Process", *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, Vol.9, No.1, pp.79-89, 2001.

[20] W.S. Choi, J.Y. Cho, C.G. Phae, "Study on Possibility of Temperature Maintenance of Anaerobic Digestion Reactor by Oxidation Heat Generated in Anerobic Fermenter", *J. of Korea Society of Waste Management*, Vol.34, No.3, pp.245-251, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.9786/kswm.2017.34.3.245>

[21] J.R. Bicudo, S.M. Goyal, "Pathogens and manure management systems: a review", *Environmental technology*, Vol.24, No.1, pp.115-130, 2003.
DOI : <https://doi.org/10.1080/09593330309385542>

[22] Enforcement Regulations of the Agricultural Mechanization Promotion Act, <http://www.law.go.kr>

[23] Methods for quality inspection of fertilizers and standards for sampling, Rural Development Administration Notice, No. 2019-32

[24] I.E. Lane, N. Beute, "A model of the domestic hot water load", *IEEE transactions on power systems*, Vol.11, No.4, pp.1850-1855, 1996.
DOI : <https://doi.org/10.1109/59.544653>

[25] Ministry of Environment, A Study on the Economic Analysis and Improvement of Installation Operation through the Evaluation of Livestock Excreta Treatment Facilities by Type, Research Report, Korea Environment Corporation, Korea, Chapter 2 pp.34, 2011

[26] Enforcement Regulations of the Ministry of Environment Act, <http://www.law.go.kr>

[27] K.H. Jeong, C.H. Park, D.Y. Choi, J.H. Kwak, C.B. Yang, H. Kang, "Physicochemical Characteristics of Fermented Pig Manure Compost and Cow Manure Compost by Pelletizing", *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, Vol.13, No.4, pp.118-127, 2005.

임 류 갑(Ryugap Lim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 성균관대학교 바이오메카트로닉스과(공학석사)
- 2020년 1월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 책임연구원

<관심분야>

농업시설, 농업에너지

장 재 경(Jae Kyung Jang)

[정회원]



- 2006년 2월 : 이화여자대학교 환경공학과(공학박사)
- 2008년 11월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구사

<관심분야>

미생물연료전지, 바이오에너지

강 태 경(Taeyoung Kang)

[정회원]



- 2004년 2월 : 충북대학교 농기계 공학과(공학박사)
- 1992년 7월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 농업연구관

<관심분야>

농업환경, 농업시설

손 진 관(Jinkwan Son)

[정회원]



- 2013년 8월 : 단국대학교 녹지조경학 습지생태전공(농학박사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 박사후연구원

<관심분야>

농업환경, 시설원예, 습지생태

이 동 관(Dongwan Lee)

[정회원]



- 2019년 2월 : 전북대학교 환경공학(공학석사)
- 2019년 1월 ~ 2021년 3월 : 농촌진흥청 국립농업과학원 에너지환경공학과 전문연구원
- 2021년 4월 ~ 현재 : SK 하이닉스 선행환경보전팀 TL

<관심분야>

폐수처리, 에너지환경, 바이오에너지