

농가 난방용 가축분뇨 고체연료 연소 보일러의 에너지 및 엑서지 분석

신동환¹⁾ · 이형원²⁾ · 김정환¹⁾ · 조종영^{3)*}

Energy and Exergy Analysis of a Livestock Manure Solid Fuel Combustion Boiler for Farm Heating

Donghwan Shin¹⁾ · Hyeongwon Lee²⁾ · Junghwan Kim¹⁾ · Jongyoung Jo^{3)*}

Received 11 April 2025 Revised 9 May 2025 Accepted 14 May 2025 Published online 18 June 2025

ABSTRACT The utilization of livestock manure as a bioresource for energy production has emerged as a promising approach, with an increasing focus on improving fuel quality and combustion efficiency. However, for the effective utilization and broader adoption of livestock manure as an energy source, research should focus on improving fuel quality and combustion efficiency and conducting system performance analysis and optimization. In this study, a numerical process model of a livestock manure solid fuel combustion boiler for farm heating was developed using Aspen plus® to perform the energy and exergy analyses. The energy and exergy flows were visualized using process stream flow diagrams, and the efficiencies of individual system components were analyzed. The simulation results indicated that the combustor exhibited the lowest exergy efficiency of 37.08% and the highest exergy destruction ratio of 69.14%, highlighting it as the most critical component for system performance improvement. Although increasing the hot-water outlet temperature could improve the exergy efficiencies of both the boiler and farm, such a change may require a different boiler type, transitioning from an atmospheric to a pressurized boiler, and could result in crop damage due to overdrying. Therefore, this issue must be considered carefully.

Key words Livestock manure(가축분뇨), Solid fuel(고체연료), Boiler(보일러), Energy(에너지), Exergy(엑서지)

Nomenclature

Calc. : Calculated value

\dot{E} : Exergy, kW

$e_{ch}(T_0)$: Standard chemical exergy, kJ/kg

h : Enthalpy, kJ/kg

LHV : Lower heating value, kJ/kg

\dot{m} : Mass flow rate, kg/s

R : Ideal gas constant, 0.287 kJ/kg·K

s : Entropy, kJ/kg·K

T : Temperature, K

\dot{W} : Power, kW

x : Mole fraction

β : Chemical exergy factor

η : Efficiency

γ : Ratio

1) Associate Researcher, Power Generation & Environment Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

2) Senior Researcher, Power Generation & Environment Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

3) Principle Researcher, Power Generation & Environment Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

*Corresponding author: jongyoung.jo@kepco.co.kr

Tel: +82-42-865-5421

Fax: +82-42-865-5409

Subscript

0	: Standard states
<i>bf</i>	: Bio fuel
<i>ch</i>	: Chemical
<i>dest</i>	: Destruction
<i>flue</i>	: Flue gas
<i>gas</i>	: Gas mixture
<i>i</i>	: i^{th} components
<i>kn</i>	: Kinetic
<i>liquid</i>	: Liquid mixture
<i>ph</i>	: Physical
<i>pro</i>	: Product
<i>pt</i>	: Potential
<i>urea</i>	: Urea solution

1. 서론

국내에서는 연간 약 5천만 톤 이상의 가축분뇨가 발생하고 있으며, 이 중 80% 이상은 퇴비화 또는 액비화 방식으로 처리되고 있다.^[1] 하지만, 비료 살포가 가능한 국내 농경지 면적은 점차 감소하는 추세이고, 더불어 축산 부문의 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위해서는 기존의 퇴·액비화 중심의 처리 방식에서 에너지화 기반의 처리 방식으로의 전환이 필요하다. 이에 따라 정부는 가축분뇨의 에너지화를 위한 다양한 제도적, 기술적 개선을 추진 중이다.^[2]

가축분뇨의 에너지화 방법은 고체연료화, 바이오가스화, 가스화, 열분해 등 다양한 방식이 존재하며,^[3~5] 이 중 한국전력공사에서는 고체연료화 방식을 기반으로 한 농축산 분야의 화석연료 대체 난방용 연소 보일러 개발 연구를 수행하고 있다.^[6,7] 현재 경상북도 청송군 원예 시설 및 봉화군 산란계 사육 시설에 해당 보일러 실증설비를 운영 중이다.

일반적으로 가축분뇨 고체연료는 축사에서 발생한 분뇨를 콤포스트 등 부숙 설비를 활용하여 건조한 뒤, 이물질을 선별·파쇄하고 펠릿 형태로 성형·재건조하여 제조된다. 생산된 고체연료를 실제 연료로 활용하기 위해서는 환경부 고시 제2018-114호 「가축분뇨 고체연료시설의 설치 등에

관한 고시」에 명시되어 있는 법적 품질 기준을 충족해야 한다. 이에 따라, 국내에서는 가축분뇨 고체연료의 품질 향상을 위한 연구가 주로 수행 되어왔으나,^[8~10] 보일러 열효율 또는 연소 측면에서 개선 연구는 거의 전무한 실정이다.

한편, 해외에서는 가축분뇨 및 고체연료의 연소 특성에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다. Gürel 등은 계분과 갈탄을 순환 유동층 보일러에서 혼합 연소하여 혼합비에 따른 CO, CO₂, NO_x, SO₂ 발생량을 분석하였으며,^[11] Wzorek 등은 우분, 낙타분과 면화 줄기, 유채유 찌꺼기를 혼합한 펠릿형 연료의 기계적 특성과 연소 특성을 분석하였다.^[12] Da Lio 등은 마분을 에너지원으로 활용하기 위하여 다양한 지역에서의 마분 샘플을 채취하여 조성, 함수율, 발열량 등을 분석하였으며,^[13] Jiang 등은 우분을 연료로 활용하기 위해 연소 온도, 산소 농도 등 환경 조건 변화에 따른 연소 특성을 분석하였다.^[14] 이처럼 가축분뇨의 종류 및 조건에 따른 연소 성능 및 특성 분석 연구는 해외에서 활발히 수행 되어 왔으나, 시스템 측면에서 가축분뇨 보일러를 연구한 사례는 국내외를 통틀어 거의 진행된 사항이 없다.

가축분뇨 고체연료 연소 보일러는 일반적인 보일러 시스템과 유사하게 블로어, 연소로, 보일러 본체, 순환수 펌프, 대기오염물질 저감 장치 등 다양한 기계장치로 설비가 구성된다. 그러나 가축분뇨 고체연료는 앞서 언급한 법적 품질 기준상 연료 내 회분 함량이 최대 30%, 수분 함량이 최대 20%, 저위 발열량은 3,000 kcal/kg 수준으로, 석탄이나 목재펠릿 등 타 고체연료에 비해 품질이 낮아 안정적인 연소와 효율적인 운영에 어려움이 존재한다. 그럼에도 불구하고, 국내 가축분뇨 처리방식의 전환과 축산 부문의 온실가스 저감을 위해 가축분뇨를 에너지자원으로 활용하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 연료 자체의 품질 개선 연구뿐만 아니라, 연료를 활용하는 보일러의 정량적 분석을 통해 개선이 필요한 구성요소를 파악함으로써 전체 시스템 효율을 향상하는 연구가 동반되어야 한다.

본 연구에서는 농가 난방용 가축분뇨 고체연료 연소 보일러 시스템의 에너지 및 엑서지 분석을 수행하였다. 분석을 위한 보일러 시스템은 공정모사 프로그램인 Aspen Plus[®]을 이용하여 모델링하였으며, 기준 운전 조건 하에서의 각 설비 구성요소 및 공정 단계별 에너지, 엑서지 변화를 파악하였다. 공정 흐름 및 구성 요소별 효율 분석을 통해 개선

이 필요한 부분을 도출하였으며, 개선 사항 반영을 위해 함께 고려되어야 하는 사항을 제시하였다. 본 연구 결과는 향후 국내 가축분뇨 고체연료 연소, 운영, 시스템 측면에서 연구를 위한 기반 자료로 활용될 수 있다.

2. 시스템 구성도

농가 난방용 가축분뇨 고체연료 연소 보일러의 전반적인 시스템 구성도는 아래 Fig. 1과 같다. 공기는 블로어를 통해 공급되며(Stream 1→2), 연소가스와의 열교환 후 예열되어 연소실로 공급된다(Stream 2→3). 연소실에서는 공급된 연료와 공기가 연소하며(Stream 3+4→5), 소각재는 외부 저장고로 배출된다(Stream 10). 연소가스는 SNCR(Selective non-catalytic reduction)을 통해 NOx가 저감되며(Stream 5+6→7), 해당 연소가스와 보일러 순환수의 열교환을 통해 온수가 생산된다(Stream 11→12). 생산된 온수는 농가에 난방 배관을 통해 대류 및 복사 열전달 방식으로 내부 난방을 하며(Stream 12→13), 농가 난방 후 온도가 낮아진 온수는 순환 펌프를 통해 보일러로 다시 환수된다(Stream 13→11). 실제 보일러 설비는 연료 저장을 위한 호퍼, 연료 공급 및 소각재 배출을 위한 스크류 피더, 연소가스의 대기 배출을 위한 ID Fan, 비산재와 먼지 제거를 위한 사이클론 및 백필터, 운영 및 제어를 위한 PLC 설비 등 다양한 기계장치가 부수적으로 존재하나, 모델링 간략화 및 데이터 정합성 향상을 위해 입·출구 압력, 온도, 조성 변화가 발생하여 필수적으로 고려해야 하는 설비들만 반영하여 시스템 분석을 수행하였다.

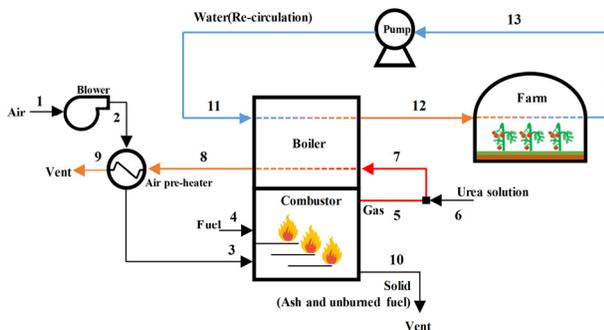


Fig. 1. Schematic diagram of a livestock manure solid fuel combustion boiler system for farm heating

3. 모델링

3.1 가축분뇨 고체연료

연료 모델링에 활용한 물성 데이터는 2024년 6월경 경상북도 영주시 축산기술연구소에서 채취한 시료로 제한한 우분 고체연료 데이터이며, 측정된 물성값은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of cattle manure solid fuel

Parameters	Unit	Value
Water content	%	11.17
Total solid	%	88.83
Volatile solid	%	53.72
Fixed carbon	%	15.57
Ash	%	19.54
Higher heating value	kcal/kg	3,830
Lower heating value	kcal/kg	3,100
Carbon	%	35.34
Hydrogen	%	4.44
Nitrogen	%	1.51
Sulfur	%	0.91
Oxygen	%	27.00
Chloride	%	0.09

측정 데이터 중 산소 및 고정탄소는 ISO 16559:2022 「Solid biofuels」, 나머지 데이터는 환경부 고시 제2020-219호 「고형연료제품 품질 시험·분석방법」을 표준으로 준용하여 측정하였다. 수분(Water content, WC)을 제외한 값은 dry basis에서 측정되었으나, 데이터 식별이 용이하도록 수분, 휘발분(Volatile solids, VS), 회분(Ash), 고정탄소(Fixed carbon, FC)의 합은 100%가 되도록, 탄소(C), 수소(H), 질소(N), 황(S), 산소(O), 염소(Cl), 회분의 합은 총 고형분(Total solid, TS=VS+FC+Ash)이 되도록 값을 보정 후 표에 명기하였다.

3.2 화학반응 및 작동조건

공정모사 모델링에 고려된 연소 반응, 질소산화물 생성 반응, 탈질 반응 및 블로어, 펌프, 열교환기 등 세부적인 모델링 방법은 선행 연구에 자세히 기술되어 있다.^[6,7] 본 해석에 활용된 가축분뇨 고체연료 보일러 사양 및 작동조건

은 Table 2와 같으며, 국내에 개발된 보일러 제품의 작동조건과 유사하다.

우레아 수용액은 연소가스에 포함된 질소산화물 발생량에 맞춰 공급되며, 선행연구에서 수행한 SNCR 온도별 전환 효율에 따라 저감된다.^[7] 보일러 온수는 85°C에 도달하도록 순환수가 공급되며, 농가에 20°C 차이만큼의 열량을 공급한 후 65°C로 환수된다. 블로어, 펌프, 공기 예열기의 효율은 아래 Table 3과 같다.

Table 2의 예열공기 온도는 Table 3의 공기에열기의 유용도를 반영하여 계산된 값이다.

Table 2. Operating conditions and constraints for the simulation of the livestock manure solid fuel combustion boiler

Parameters	Unit	Value
Heating output	kW _{th}	600
Operating temperature	°C	875
Operating pressure	bar	1
Excess air	-	1.6
Air supply temperature	°C	25
Pre-heated air temperature (Calc.)	°C	93.7
Hot water temperature	°C	85
Hot water temperature difference	°C	20
Boiler effectiveness	-	0.88
Blower outlet pressure	bar	1.05
Pump outlet pressure	bar	3
Unburned carbon	%	3
Urea solution concentration	%	10
Heat loss	%	3

Table 3. Efficiencies of components

Components	Isentropic efficiency	Mechanical efficiency	Effectiveness
Blower	0.7	0.95	-
Pump	0.6	0.95	-
Air pre-heater	-	-	0.88

3.3 엑서지

일을 할 수 있는 능력으로 정의되는 에너지는 열역학 제1법칙에 의해 에너지 전환 과정에서의 총량이 동일하다. 하지만 에너지 형태 전환으로 인해 일을 할 수 있는 능력의 질적인 부분에서의 손실이 발생하게 되며, 이를 정량화하는

것이 중요하다. 엑서지는 현재 상태에서 주변 환경을 고려하여 일을 할 수 있는 능력의 질적인 부분까지 고려하는 지표이다. 그렇기에 에너지 및 엑서지 분석을 수행하면, 전체 시스템 측면에서의 효율 분석과 질적 손실이 큰 요소 기기의 개선 사항에 대한 도출이 가능하다. 총 엑서지 계산식은 아래와 같다.^[15]

$$\dot{E} = \dot{E}_{ph} + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_{km} + \dot{E}_{pt} \quad (1)$$

\dot{E} 는 엑서지, \dot{E}_{ph} , \dot{E}_{ch} , \dot{E}_{km} , \dot{E}_{pt} 는 각각 물리, 화학, 운동, 위치 엑서지이며, 운동 엑서지와 위치 엑서지는 변화가 거의 없기에 무시한다. 물리 엑서지 계산식은 다음과 같다.

$$\dot{E}_{ph} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (2)$$

\dot{m} 은 질량 유량, h , s 는 각각 해당 stream에서의 엔탈피와 엔트로피, h_0 , s_0 , T_0 는 각각 기준 상태에서의 엔탈피, 엔트로피, 온도이다. 본 엑서지 해석에 사용된 기준 상태는 25°C, 1 atm이다. 연료를 포함하여 stream에 공급되는 물질이 대기 환경과의 조성이 달라 화학 반응이 발생하는 경우와 반응 후 물질이 화학 측면에서 일을 할 수 있는 경우에는 화학 엑서지를 고려해야하며, 화학 엑서지를 계산하는 수식은 아래와 같다.

$$\dot{E}_{ch} = \dot{m} \left(\sum_{i=1}^k x_i e_{ch}(T_{0,i}) + RT_0 \sum_{i=1}^k x_i \ln x_i \right) \quad (3)$$

x_i 와 $e_{ch}(T_{0,i})$ 는 각각 i번째 구성요소의 몰분율 및 표준 화학 엑서지, R 은 이상 기체 상수이다. 표준 화학 엑서지는 해당 물질이 표준 상태에서 주변 환경과의 기준 물질과 반응하여 시스템이 평형에 도달할 때 얻을 수 있는 최대 일이며, 해당 시뮬레이션에서 고려한 물질들의 표준 화학 엑서지는 Table 4와 같다.^[16,17]

화학 엑서지는 각 stream 구성요소의 몰분율 및 표준 화학 엑서지를 고려하여 계산하였으며, 표준 화학 엑서지의 기준 상태는 25°C, 1 atm이다. 바이오매스 등 유기성 고체 연료는 조성이 다양하고 구조가 복잡하기에 화학 엑서지를 정확하게 산출하는 것이 어려운데, 이러한 유기 물질들의 C, H, N, S, O 원소비와 저위 발열량을 이용한 근사 경험

Table 4. Standard chemical exergy

Component (Phase)	unit	Value
C (s)	kJ/mol	409.87
CO (g)		274.71
CO ₂ (g)		19.48
Cl (g)		87.10
H ₂ (g)		236.09
H ₂ O (g)		9.50
H ₂ O (l)		0.90
N ₂ (g)		0.72
NO (g)		88.90
NO ₂ (g)		55.60
N ₂ O (g)		106.90
O ₂ (g)		3.97
S (s)		609.60
SO ₂ (g)		313.40
SiO ₂ (s)		8.20
H (s)		320.82
O (s)		231.97
N (s)		453.82
Ar (g)		11.69
CH ₄ N ₂ O (s)		688.60

식을 도출한 연구들이 존재하며,^[16,18,19] 기본적인 방정식은 아래와 같다.

$$\dot{E}_{ch(bf)} = \dot{m}_{bf} \cdot \beta_{bf} \cdot LHV_{bf} \quad (4)$$

Table 5. Exergy equations for individual streams

Working fluid	Stream	Exergy (kW)
Air	1	$\dot{m}_{air} [(h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0)] + \dot{E}_{ch,air}$
	2	$\dot{m}_{air} [(h_2 - h_0) - T_0 (s_2 - s_0)] + \dot{E}_{ch,air}$
	3	$\dot{m}_{air} [(h_3 - h_0) - T_0 (s_3 - s_0)] + \dot{E}_{ch,air}$
Fuel	4	$\dot{m}_{bf} \cdot \beta_{bf} \cdot LHV_{bf}$
Flue gas	5	$\dot{m}_{flue} [(h_5 - h_0) - T_0 (s_5 - s_0)] + \dot{E}_{ch,gas}$
	7	$(\dot{m}_{flue} + \dot{m}_{urea}) \cdot [(h_7 - h_0) - T_0 (s_7 - s_0)] + \dot{E}_{ch,gas}$
	8	$(\dot{m}_{flue} + \dot{m}_{urea}) \cdot [(h_8 - h_0) - T_0 (s_8 - s_0)] + \dot{E}_{ch,gas}$
Urea solution	9	$(\dot{m}_{flue} + \dot{m}_{urea}) \cdot [(h_9 - h_0) - T_0 (s_9 - s_0)] + \dot{E}_{ch,gas}$
	6	$\dot{m}_{urea} [(h_6 - h_0) - T_0 (s_6 - s_0)] + \dot{E}_{ch,liquid}$
Ash	10	$\dot{m}_{ash} [(h_{10} - h_0) - T_0 (s_{10} - s_0)] + \dot{E}_{ch,ash}$
Water	11	$\dot{m}_{water} [(h_{11} - h_0) - T_0 (s_{11} - s_0)]$
	12	$\dot{m}_{water} [(h_{12} - h_0) - T_0 (s_{12} - s_0)]$
	13	$\dot{m}_{water} [(h_{13} - h_0) - T_0 (s_{13} - s_0)]$

$\dot{E}_{ch(bf)}$, \dot{m}_{bf} , β_{bf} , LHV_{bf} 은 각각 바이오연료의 화학 엑서지, 질량 유량, 엑서지 계수, 저위 발열량이다. 여러 근사식 중 산소와 탄소의 비가 2 이하일 때 유기 고체연료에 이용되는 식을 적용하여 연료의 화학 엑서지를 계산하였으며,^[16] 사용된 엑서지 계수 식은 아래와 같다.

$$\beta = \frac{1.044 + 0.016 \frac{H}{C} - 0.3493 \frac{O}{C} (1 + 0.0531 \frac{H}{C}) + 0.0493 \frac{N}{C}}{1 - 0.4124 \frac{O}{C}} \quad (5)$$

엑서지 계수 식에 입력되는 원소는 건조 상태(Dry basis)에서의 물분율이 기준이 되며, 본 연구에 적용된 가축분뇨 고체연료 조성에서 엑서지 계수는 1.1248이다. Stream 10 소각재의 엄밀한 화학 엑서지 계산을 위해서는 SiO₂, CaO, K₂O 등 소각재의 정확한 조성을 포함하여 해당 조성에서의 표준 화학 엑서지가 모두 반영되어야 한다. 하지만 매우 복잡한 조성에 비해 전체 시스템 해석에 소각재가 차지하는 비율은 낮기 때문에, 간략화된 계산을 위하여 소각재의 미연탄소를 제외한 부분은 모두 소각재 중 비율이 가장 높은 성분인 SiO₂인 것으로 가정하였다. Fig. 1의 구성도를 토대로 각 stream에서의 엑서지 계산식을 정리하면 Table 5와 같다.

전체 시스템의 구성요소 별 엑서지 효율 분석을 위해서

는 각 구성요소의 엑서지 투입량과 엑서지 산출량의 파악이 필요하며, 아래 식으로 표현이 가능하다.

$$\dot{E}_{fuel} = \sum \dot{E}_{inlet} \quad (6)$$

$$\dot{E}_{pro} = \sum \dot{E}_{outlet} \quad (7)$$

\dot{E}_{fuel} 은 엑서지 투입량이며 구성요소에 공급되는 엑서지의 합이고, \dot{E}_{pro} 은 엑서지 산출량이며 구성요소에서 나가는 엑서지의 합이다. 펌프, 블로어 등 전력 소비 장치는 \dot{E}_{fuel} 에 소비되는 전력을 반영하여 계산한다. 각 구성요소에서 발생하는 엑서지 파괴 계산식은 다음과 같다.

$$\dot{E}_{dest} = \dot{E}_{fuel} - \dot{E}_{pro} \quad (8)$$

\dot{E}_{dest} 은 엑서지 파괴이며, 엑서지 투입량과 엑서지 산출량의 차이이다. 엑서지 효율 계산식은 아래와 같다.

$$\eta_{exergy} = \frac{\dot{E}_{pro}}{\dot{E}_{fuel}} = 1 - \frac{\dot{E}_{dest}}{\dot{E}_{fuel}} \quad (9)$$

η_{exergy} 은 엑서지 효율이며, 해당 식을 이용하여 각 구성

요소 별 엑서지 효율 도출이 가능하다. 전체 엑서지 파괴량에서 각 구성요소의 파괴 비율을 나타내는 엑서지 파괴비는 다음과 같이 계산된다.

$$\gamma_{dest,i} = \frac{\dot{E}_{dest,i}}{\sum \dot{E}_{dest}} \quad (10)$$

$\gamma_{dest,i}$, $\dot{E}_{dest,i}$ 는 각각 i번째 구성요소의 엑서지 파괴비와 엑서지 파괴이다. 엑서지 파괴비 분석을 통해 전체 시스템에서 엑서지 측면의 손실 비율이 가장 큰 구성요소가 무엇인지 파악 가능하다. 위에 기술된 엑서지 관련 식들을 이용하여 전체 가축분뇨 연소 보일러 시스템 구성요소 별 엑서지 계산식을 정리하면 Table 6과 같다.

4. 시뮬레이션

4.1 전체 시스템

본 모델에 적용한 주요 가정은 아래와 같다.

- 1) 전체 시스템은 정상상태이다.
- 2) 공기의 조성은 질소 78.08 vol%, 산소 20.95 vol%,

Table 6. Exergy equations for individual components

Components	\dot{E}_{fuel} (kW)	\dot{E}_{pro} (kW)	\dot{E}_{dest} (kW)	η_{exergy}
Blower	$\dot{W}_{blower} + \dot{E}_1$	\dot{E}_2	$\dot{W}_{blower} + \dot{E}_1 - \dot{E}_2$	$\frac{\dot{E}_2}{\dot{W}_{blower} + \dot{E}_1}$
Air pre-heater	$\dot{E}_2 + \dot{E}_8$	$\dot{E}_3 + \dot{E}_9$	$\dot{E}_2 + \dot{E}_8 - (\dot{E}_3 + \dot{E}_9)$	$\frac{\dot{E}_3 + \dot{E}_9}{\dot{E}_2 + \dot{E}_8}$
Combustor	$\dot{E}_3 + \dot{E}_4$	$\dot{E}_5 + \dot{E}_{10}$	$\dot{E}_2 + \dot{E}_8 - (\dot{E}_5 + \dot{E}_{10})$	$\frac{\dot{E}_5 + \dot{E}_{10}}{\dot{E}_3 + \dot{E}_4}$
SNCR	$\dot{E}_5 + \dot{E}_6$	\dot{E}_7	$\dot{E}_5 + \dot{E}_6 - \dot{E}_7$	$\frac{\dot{E}_7}{\dot{E}_5 + \dot{E}_6}$
Boiler	$\dot{E}_7 + \dot{E}_{11}$	$\dot{E}_8 + \dot{E}_{12}$	$\dot{E}_7 + \dot{E}_{11} - (\dot{E}_8 + \dot{E}_{12})$	$\frac{\dot{E}_8 + \dot{E}_{12}}{\dot{E}_7 + \dot{E}_{11}}$
Farm	\dot{E}_{12}	\dot{E}_{13}	$\dot{E}_{12} - \dot{E}_{13}$	$\frac{\dot{E}_{13}}{\dot{E}_{12}}$
Pump	$\dot{W}_{pump} + \dot{E}_{13}$	\dot{E}_{11}	$\dot{W}_{pump} + \dot{E}_{13} - \dot{E}_{11}$	$\frac{\dot{E}_{11}}{\dot{W}_{pump} + \dot{E}_{13}}$

- 아르곤 0.93 vol%, 이산화탄소 0.04 vol%이며, 공급 압력은 1 atm이다.
- 3) 압력손실은 무시한다.
- 4) 회분에서 미연탄소를 제외한 부분의 조성은 SiO₂ 100%이며, 연소 후 전량 배출된다.
- 5) 보일러 순환수의 조성은 물 100%이다.

위의 가정을 전제로 Table 1의 가축분뇨 고체연료 조성, Table 2의 보일러 작동조건, Table 3의 구성요소 효율을 적용하여 전체 시스템 시뮬레이션을 진행하였으며, 해당 조건에서의 stream 별 해석 결과는 아래 Table 7과 같다. 연소를 위한 공기는 1161.1 kg/h가 공급되며, 블로어를 통해 온도 29.4°C, 압력 1.05 bar로 상승된 후, 공기 예열기를 거쳐 연소실에 93.7°C로 공급된다. 가축분뇨 고체연료는 166.5 kg/h 공급되며, 연소실에서 연소하여 875°C 연소가스가 발생한다. 이 중 34.5 kg/h의 소각재 및 미연탄소는 외부로 배출된다. 연소가스는 SNCR 설비를 거쳐 탈질 반응 후 868.5°C로 온도가 감소하며, 이후 보일러와의 일차 열교환을 통해 105.2°C로 감소한다. 해당 연소가스는 공기 예열기와 이차 열교환 후 최종 50.5°C로 대기 배출된다.

65°C의 보일러 온수는 21,577.4 kg/h로 순환하며, 보일러에서 연소가스와의 열교환을 통해 85°C로 가열되고, 가열된 열량만큼 농가에 열에너지를 공급한 후 순환 펌프를 통해 다시 보일러로 환수된다.

Table 7. Simulation results for individual streams

Stream	Temperature (°C)	Flow rate (kg/h)	Pressure (bar)
1	25.0	1,161.1	1.01
2	29.4	1,161.1	1.05
3	93.7	1,161.1	1.05
4	25.0	166.5	1.01
5	875.0	1,293.1	1.00
6	25.0	3.1	1.01
7	868.5	1,296.2	1.00
8	105.2	1,296.2	1.00
9	50.5	1,296.2	1.00
10	875.0	34.5	1.01
11	65.0	21,577.4	3.00
12	85.0	21,577.4	3.00
13	65.0	21,577.4	1.01

4.2 에너지 분석

공급된 가축분뇨 고체연료의 연소 및 열공급 과정의 에너지 흐름도는 아래 Fig. 2와 같다.

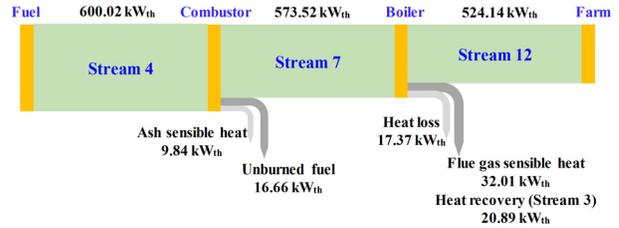


Fig. 2. Energy flow diagram of the livestock manure solid fuel combustion boiler system

600.02 kW_{th} 열량의 가축분뇨 고체연료는 연소 후 573.52 kW_{th} 열량이 보일러에 공급된다. 9.84 kW_{th}는 배출되는 고온의 소각재 현열로 손실되며, 16.66kW_{th}는 미연탄소의 열량이다. 보일러에 공급된 연소가스는 보일러 순환수와 열교환 후 최종적으로 524.14 kW_{th}가 농가에 활용된다. 공급된 열량 중 17.37 kW_{th}는 열손실량이며, 32.01 kW_{th}는 열교환 후 연소가스가 지니고 있는 현열이다. 이 중 20.89 kW_{th}는 공기 예열기에서 공기로 다시 공급되며, 11.12 kW_{th}만 대기 중에 배출되는 손실 열이다. 해당 조건에서의 연소실 열효율은 95.58%, 보일러 열효율은 91.39%, 전체 보일러 시스템 열효율은 87.35%이다.

4.3 엑서지 분석

4.3.1 엑서지 흐름

가축분뇨 고체연료 연소 보일러 시스템의 엑서지 흐름도는 Fig. 3과 같다. Stream 1에 공급된 공기는 블로어에서 1.48 kW의 전력이 소비되며, Stream 2로 2.15 kW의 엑서지가 배출되고 약 0.49 kW의 엑서지 파괴가 발생한다. 공기 예열기에서는 Stream 2의 엑서지와 Stream 8의 엑서지가 함께 공급되며, 4.42 kW의 엑서지가 연소실로 공급된다. 39.49 kW는 대기로 배출되는 연소가스의 엑서지이며, 엑서지 파괴는 0.9 kW이다. 연료의 엑서지 약 674.92 kW가 연소실로 공급되며, 연소 후 약 251.9 kW의 엑서지가 생성된다. 연소과정에서 427.44 kW의 엑서지 파괴가 발생하며, 생성된 엑서지 251.9 kW 중 미연탄소 및 소각재의 엑서지 23.52 kW는 외부로 배출된다. SNCR에서는 1.38

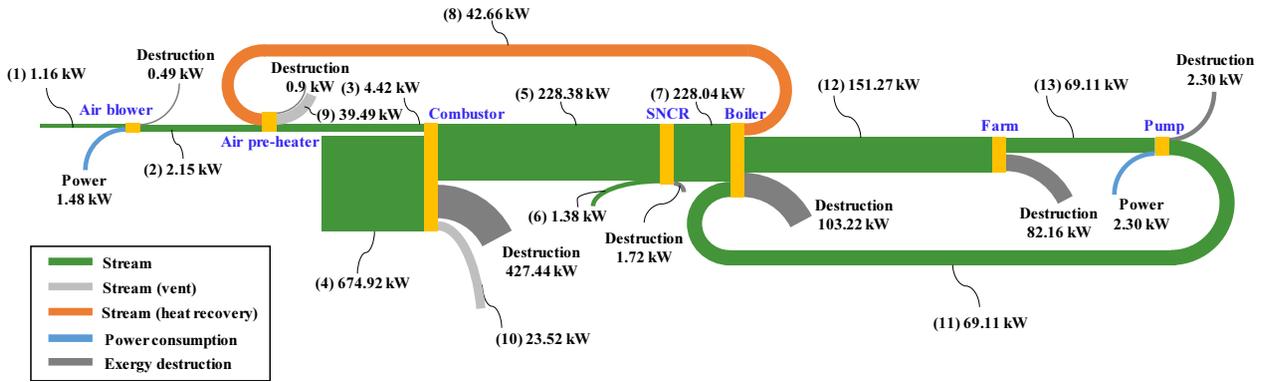


Fig. 3. Exergy flow diagram of the livestock manure solid fuel combustion boiler system

kW의 우레아 수용액 엑서지가 추가로 공급되며, 228.04 kW가 보일러로 공급된다. 이 과정에서 1.72 kW의 엑서지 파괴가 발생한다. 보일러에서는 연소가스의 엑서지 228.04 kW 및 순환수의 엑서지인 Stream 11의 69.11 kW가 공급되며, 농가로는 151.27 kW의 엑서지가 전달된다. 이 과정에서 103.22 kW의 엑서지 파괴가 발생하며, 42.66 kW는 공기 예열기로 공급된다. 농가에 공급된 엑서지 151.27 kW는 농가에서 활용되어 69.11 kW로 배출되며, 농가 열전달 과정에서 82.16 kW의 엑서지 파괴가 발생한다. 보일러 온수 순환을 위한 펌프 구동 동력이 2.30 kW 소비되며, 순환 펌프를 통해 농가에 열에너지를 전달한 온수는 보일러로 환수된다.

4.3.2 엑서지 효율

전체 시스템 구성요소 별 엑서지 효율은 아래 Fig. 4와 같다.

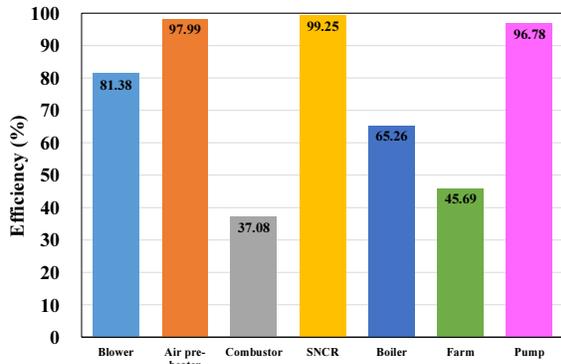


Fig. 4. Exergy efficiencies for individual components

엑서지 효율은 SNCR, 공기 예열기, 펌프, 블로어, 보일러, 농가, 연소실 순으로 높았으며, 엑서지 효율이 가장 높은 공기 예열기의 효율은 97.99%이며, 엑서지 효율이 가장 낮은 연소실의 효율은 37.08%이다. 엑서지 효율은 엑서지 투입량 대비 엑서지 산출량이 낮을수록 저하되기에, 엑서지 효율이 낮다는 것은 그 구성요소의 산출물이 에너지 질적인 측면에서의 높은 하락이 발생하였음을 의미한다. 전체 시스템 엑서지 효율 측면에서 개선이 가장 시급한 설비는 연소실이고, 연소실 엑서지 효율 개선을 위해서는 연소 온도의 상승이 필요하나, 가축분뇨 고체연료 및 연소설비의 특성상 온도를 상승하는데 제한사항이 존재할 수 있기 때문에 이 부분의 고려가 필요하다. 그 다음으로 엑서지 효율 측면에서 개선이 필요한 부분은 농가이다. 현재 시물레이션에서는 농가의 입·출수 온도차가 20°C로 고정되어 있다. 온수 온도가 85°C인 조건에서 엑서지 효율 향상을 위해서는 출수의 온도가 높아져야 하나, 이는 생산한 열을 농가에서 덜 활용한다는 것을 의미한다. 또는 온수 온도가 85°C 이상의 조건에서 농가에 공급되는 경우에도 엑서지 효율 개선이 가능하나, 온도가 더 높아지면 상압에서 구동되는 온수 보일러가 아닌 스팀 보일러 형태로 설비가 바뀌어 압력 및 안전 측면에서의 추가적인 비용이 발생할 수 있으며, 또한 더 높은 온도에서 열 공급을 하게 될 경우 오히려 작물 마름 등의 피해가 발생할 수 있기 때문에 해당 부분의 엑서지 효율 개선은 현실적으로 어려운 부분이 있다.

4.3.3 엑서지 파괴비

엑서지 효율은 해당 구성요소의 엑서지 투입량 대비 산출

량의 비율이기 때문에 절대적인 엑서지 파괴량의 비교는 어려우며, 해당 부분 분석을 위해서는 엑서지 파괴비 산출이 필요하다. 전체 시스템의 엑서지 파괴비는 Fig. 5와 같다.

분석 결과, 엑서지 파괴비는 연소실, 보일러, 농가, 펌프, SNCR, 공기 예열기, 블로어 순으로 높았으며, 엑서지 파괴비가 가장 높은 연소실은 69.14%를 차지하며, 블로어가 0.08%로 가장 낮았다. 엑서지 파괴비가 크다는 것은 전체 엑서지 파괴량에서 차지하는 비율이 높다는 것으로, 파괴비가 높은 구성요소와 상대적으로 낮은 구성요소가 동일한 수준의 엑서지 효율이 개선될 경우, 파괴비가 높은 구성요소의 엑서지 파괴량이 더 많이 줄어든다는 것을 의미한다. 그렇기에 엑서지 효율과 엑서지 파괴비의 병행 비교가 필요하다. 엑서지 효율과 동일하게 개선이 가장 필요한 구성요소는 연소실이다. 엑서지 효율과는 달리 그다음으로 개선이 필요한 부분은 보일러이다. 보일러의 엑서지 파괴비가 농가의 엑서지 파괴비보다 높기 때문에 동일한 효율 개선 시 기대되는 엑서지 파괴 절감량은 높으나, 보일러는 엑서지 효율이 더 높은 구성요소이기 때문에 효율을 올리기가 상대적으로 어렵다. 펌프, 공기 예열기, SNCR은 엑서지 효율도 높고 엑서지 파괴비도 낮기 때문에 개선 순위가 낮으며, 블로어의 엑서지 효율은 상대적으로 낮지만 엑서지 파괴비가 0.08% 수준으로 전체 엑서지 파괴량에서 차지하는 비중이 매우 적어, 엑서지 효율의 개선 시에도 전체 엑서지 파괴량의 저감은 기대하기 어렵다. 보일러의 출수 온도가 높아지면 보일러와 농가의 엑서지 효율 개선이

동시에 가능하나, 앞에 언급한 설비 개선 부분이 추가적으로 고려되어야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 농가 난방용 가축분뇨 고체연료 연소 보일러 시스템의 공기, 연료 투입부터 농가 난방까지 전 공정에 대한 분석을 진행하였으며, 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 연소실, 보일러, 전체 시스템의 열효율은 각각 95.58%, 91.39%, 87.35%이다.
- 2) 엑서지 효율은 SNCR, 공기 예열기, 펌프, 블로어, 보일러, 농가, 연소실 순으로 높았으며 효율은 각각 99.25%, 97.99%, 96.78%, 81.38%, 65.26%, 45.69%, 37.08%이다.
- 3) 엑서지 파괴비는 연소실, 보일러, 농가, 펌프, SNCR, 공기 예열기, 블로어 순으로 높았으며 파괴비는 각각 69.14%, 16.70%, 13.29%, 0.37%, 0.28%, 0.15%, 0.08%이다.
- 4) 연소실의 개선을 통한 연소온도 상승이 엑서지 효율 및 파괴비 측면에서 가장 중요하지만, 연료 및 연소 설비의 특성 고려가 필요하다.
- 5) 엑서지 파괴비는 보일러가 농가보다 높기 때문에 동일한 엑서지 효율 개선 시 엑서지 파괴비 측면에서의 엑서지 파괴 절감량은 더 많지만, 엑서지 효율이 더 높기 때문에 효율 자체의 상승이 상대적으로 어렵다.
- 6) 보일러 온수 온도를 85°C 이상에서 농가로 공급하면 보일러 및 농가에서의 엑서지 효율 개선이 동시에 가능하나, 기존 상압식에서 가압식 스팀 보일러로 설비 종류가 바뀔 수 있고 작물에 피해를 끼칠 수 있기 때문에 이 부분의 고려가 필요하다.

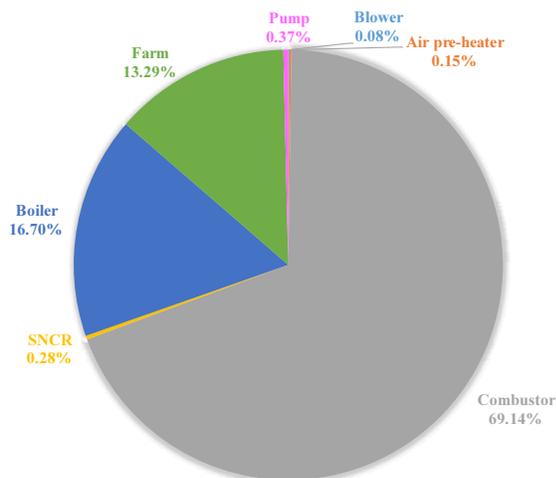


Fig. 5. Exergy destruction ratio for individual components

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20227410100080).

References

- [1] Ministry of Environment, 2024, “Generation and Treatment of Livestock Manure”, Ministry of Environment, https://www.me.go.kr/home/web/public_info/read.do?sessionId=EwfO3skDzd5S7BtPmI4yS52VciUanbHEAnVZkEKqUgZyviWW6aVfl6HRY51HgImb.meweb2vhost_servlet_engine1?pagerOffset=30&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10357&orgCd=&condition.publicInfoMasterId=3&publicInfoId=88&menuId=10357.
- [2] Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2024, Accessed 3 January 2024, “2030 Greenhouse gas reduction and green growth strategy in the livestock sector”, <https://www.ihanwoo.org/19248>.
- [3] Khoshnevisan, B., Duan, N., Tsapekos, P., Awasthi, M.K., Liu, Z., Mohammadi, A., Angelidaki, I., Tsang, D.C.W., Zhang, Z., Pan, J., *et al.*, 2021, “A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability, challenges, and future perspectives”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **135**, 110033.
- [4] Bidart, C., Fröhling, M., and Schultmann, F., 2014, “Livestock manure and crop residue for energy generation: Macro-assessment at a national scale”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **38**, 537-550.
- [5] Sasikumar, C., Sundaresan, R., Nagaraja, M., and Rajaganapathy, C., 2020, “A review on energy generation from manure biomass”, *Mater. Today*, **45**(2), 2408-2412.
- [6] Shin, D., Lee, H., Jung, H., Choi, J., and Jo, J., 2023, “Development of a numerical analysis model for heating and power generation system combining a cattle manure solid fuel combustion boiler and the organic Rankine cycle”, *New. Renew. Energy*, **19**(4), 61-71.
- [7] Shin, D., Lee, H., Kim, J., and Jo, J., 2024, “Computational analysis of nitrogen oxides reduction in exhaust gas from livestock manure solid fuel using urea-based selective non-catalytic reduction”, *New. Renew. Energy*, **20**(3), 1-11.
- [8] Lee, S., Yu, B., Ju, S., Kang, Y., and Jung, G., 2016, “Characteristics analysis for solid fuel from swine manure”, *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **33**(7), 654-658.
- [9] Lee, S., Yu, B., Ju, S., Kang, Y., and Jung, G., 2016, “Characteristics of solid fuel from cattle manure”, *New. Renew. Energy*, **12**(4), 64-69.
- [10] Jeong, K.H., Lee, D.J., Lee, D.H., and Lee, S.H., 2019, “Combustion characteristics of cow manure pellet as a solid fuel source”, *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.*, **27**(2), 31-40.
- [11] Gürel, B., Kurtuluş, K., Yurdakul, S., Karaca Dolgun, G., Akman, R., Önür, M. E., Varol, M., Keçebaş, A., and Gürbüz, H., 2024, “Combustion of chicken manure and Turkish lignite mixtures in a circulating fluidized bed”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **189**, 113960.
- [12] Wzorek, M., Junga, R., Yilmaz, E., and Niemiec, P., 2021, “Combustion behavior and mechanical properties of pellets derived from blends of animal manure and lignocellulosic biomass”, *J. Environ. Manage.*, **290**, 112487.
- [13] Da Lio, L., Castello, P., Gianfelice, G., Cavalli, R., and Canu, P., 2021, “Effective energy exploitation from horse manure combustion”, *Waste Manag.*, **128**, 243-250.
- [14] Jiang, C., Lin, Q., Wang, C., Jiang, X., Bi, H., and Bao, L., 2020, “Experimental study of the ignition and combustion characteristics of cattle manure under different environmental conditions”, *Energy*, **197**, 117143.
- [15] Dincer, I., and Rosen, M.A., 2007, “Exergy”, Elsevier Science.
- [16] Szargut, J., 2005, “Exergy Method: Technical and Ecological Applications”, WIT Press.
- [17] Hajinezhad, A., Ziaee Halimehjani, E., and Tahani, M., 2016, “Utilization of Refuse-Derived Fuel (RDF) from Urban Waste as an Alternative Fuel for Cement Factory: a Case Study”, *Int. J. Renew. Energy Res.*, **6**(2), Article 304742760.
- [18] Kotas, T.J., 1985, “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Butterworth-Heinemann Ltd.
- [19] Hagi, H., Nemer, M., Le Moullec, Y., and Bouallou, C., 2013, “Pathway for Advanced Architectures of Oxy-pulverized Coal Power Plants: Minimization of the Global System Exergy Losses”, *Energy Procedia*, **37**, 1331-1340.