

# 바이오매스 활용 연료전지 열병합발전시스템을 위한 연료화 공정

홍기훈<sup>†</sup> · 엄성현 · 황상연

고등기술연구원 플랜트공정개발센터  
(2022년 7월 4일 접수, 2022년 7월 14일 수정, 2022년 7월 18일 채택)

## Biomass Gasification for Fuel Cell Combined-Heat-and-Power Systems

Gi Hoon Hong<sup>†</sup>, Sunghyun Uhm and Sangyeon Hwang

Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin-si 17180, Korea  
(Received July 4, 2022; Revised July 14, 2022; Accepted July 18, 2022)

### 초 록

화석연료 사용 비중이 큰 농업분야에서는 최근 불안한 국제경제와 맞물린 에너지 가격 상승과 활발한 스마트팜 보급으로 전력사용량까지 증가하는 에너지 사용 패턴 변화로 새로운 국면을 맞고 있다. 따라서 친환경 분산형 전원으로 연료전지를 이용하며, 바이오매스를 직접 연료로 사용할 수 있는 연료전지 열병합발전 시스템은 농가에 열 및 전기에너지를 동시에 공급할 수 있는 효과적인 에너지시스템으로 인식되고 있다. 본 총설 논문에서는 바이오매스, 특히 농업 부산물을 연료로 활용하기 위한 연료전지 기반의 열병합발전 시스템에 대한 공정 구성과 기술적 동향을 제시하고, 통합 연계공정 설계 시 고려해야 할 부분들을 논의하고자 한다.

### Abstract

In the agricultural sector where the fossil fuels are primary energy resources, the current global energy crisis together with the dissemination of smart farming has led to the new phase of energy pattern in which the electricity demand is growing faster particularly. Therefore, the fuel cell combined heat and power system, coupling the environmentally friendly fuel cell to biomass treatment and feeding, can be regarded as the most effective energy system in agriculture. In this mini-review, we discuss the R&D trend of the fuel cell combined heat and power system aimed at utilizing agricultural by-products as fuels and highlight the issues in terms of the process configuration and interconnection of individual processes.

**Keywords:** Fuel Cell, Biomass gasification, Torrefaction, Combined heat and power, Smart farming

## 1. 서 론

최근 유엔기후변화총회(The UN Climate Change Conference, COP21 and COP25)에서 결정된 기후변화협약의 후속조치로 한국에서는 “2020년 온실가스 배출전망(Business As Usual, BAU) 대비 30% 감축”이라는 자발적 목표를 제시함에 따라 온실가스 및 대기오염물질 저감 필요성이 대두되고 있다[1]. 특히 국내 부문별 온실가스 배출량은 주로 에너지 부문에서 발생되고 있으며[Figure 1(a)][2], 그 중 약 35.5%가 공공전기 및 열을 생산하는 과정에서 배출되고 있다. 국내 에너지원별 전기 생산량 중 화석연료를 통한 전기 생산은 원자력과 신재생에너지 등을 제외하면 약 62%로, 주로 연소를 통해 발전과 열을 생산하기 때문에 온실가스 배출량 또한 비중이 크다[Figure 1(b)][3].

에너지 생산부문에서 온실가스를 줄이기 위한 방안으로 바이오매

스 활용이 고려되고 있으며, 바이오매스는 화석연료 및 태양광, 풍력 등 신재생에너지와는 달리 지역편중 없이 고르게 분포되어 있고, 에너지소모량 대비 탄소배출이 적어 탄소중립 성격을 지닌 자원이다[4]. 과거 바이오매스를 활용하는 기술로는 수집된 바이오매스 원료 그대로 연소시켜 열원을 얻는 형태로 사용되어 왔으나, 최근에는 에너지 효율향상과 탄소배출 저감을 달성하기 위해 열 및 화학적 전환을 통한 고품질 바이오매스 연료를 생산하여 에너지 생산공정과 연계하는 기술개발이 이뤄지고 있다[5]. 특히 바이오매스를 발효 및 열분해 등 화학적 방법으로 메탄(CH<sub>4</sub>)을 생산하고 이를 합성가스(H<sub>2</sub>+CO)로 전환하여 후속공정의 연료로 공급함으로써 지속가능한 탄소중립적인 에너지 활용기술로 논의되고 있다[6].

농업부산물의 형태로 바이오매스가 다량 발생하는 국내 농업분야에서는 화석연료 사용 비중이 높으며, 특히 농기구와 온실의 난방 등을 모두 경유와 등유를 이용하기 때문에 석유류의 사용량이 압도적으로 높다. 아울러 최근 효율적인 농작물 생산을 위해 스마트팜 도입이 확대됨에 따라 매년 농업분야 전력사용량이 증가하고 있는 실정이다.

따라서 농업분야의 에너지 사용 패턴 변화에 맞춰 바이오매스를 활용한 열 및 전기에너지를 생산할 수 있는 all-in-one 형태의 에너지 생산 설비의 필요하다 판단되며, 본 논문에서는 농가에서 발생하는 농

<sup>†</sup> Corresponding Author: Institute for Advanced Engineering  
Plant Process Development Center, Yongin-si 17180, Korea  
Tel: +82-31-330-7847 e-mail: run1600@iae.re.kr



**Table 1. Description of the Typical Characteristics of Fuel Cells[12-18]**

Type of Fuel Cell	LT-PEMFC	HT-PEMFC	SOFC
Temperature	60~80 °C	140~180 °C	300~1000 °C
Net electrical efficiency	35~45%	35~45%	35~60%
System efficiency	75~90%	75~90%	75~90%
Applicability	Commercial	Near-term commercial	Commercial
Advantages	High electrical efficiency, rapid start-up, high power density, proven technology, low emissions	High electrical efficiency, simple water management, compact and practical design, lower quality syngas can be used	High electrical efficiency, simple water management, enhanced kinetics, simple fuel processing
Disadvantages	Problematic water management, very high purity needed in syngas (less than 10 ppm), expensive catalyst (platinum)	Short lifetime	Slow start-up and shut-down procedures, complicated heat recovery

성가스 중 일산화탄소 함량에 민감하지 않아 합성가스의 H<sub>2</sub>/CO 비가 낮아도 시스템 운영이 가능하다는 장점이 있다.

바이오매스 연료화로 생성된 합성가스는 일산화탄소의 함량이 일반 수소추출반응에 비해 높으므로 이를 추가의 분리공정 없이 활용하기 위해서는 99.995% 이상의 수소순도가 필요한 PEMFC 방식보다는 SOFC 방식의 연료전지를 사용하는 것이 바람직하다.

또한 연료전지 기반의 열병합발전 시스템은 황 성분에 매우 민감하기 때문에 가스화 후 후처리 공정에 탈황공정이 필수적이며 탈황공정의 규모를 최소화하기 위해서는 가급적 황 성분 함량이 낮은 목질계 또는 초본계 등의 원료를 선택하여야 한다.

**2.2. 바이오매스 연료화**

바이오매스는 산업 폐수 또는 하수 슬러지와 농림축산 부산물 등으로 다양하며, 농림산 부산물에서는 목질계 및 초본계 바이오매스가, 산업 폐수, 하수 슬러지나 축산 부산물에서는 유기성 바이오매스가 발생한다. 유기성 바이오매스는 수분이 많아서 건조에 필요한 에너지가 다량 투입되어 메탄발효 등 생물화학적 에너지전환이 적합하고, 목질계 및 초본계 바이오매스는 비교적 수분이 적어 연소나 가스화 등의 열화학적 에너지전환이 가능하다. 대표적인 목질계 및 초본계 바이오매스의 물질 구성을 Table 2에 나열하였다.

따라서 합성가스 생산을 위해서는 목질계 및 초본계 바이오매스를 활용해야 하나, 연소 및 가스화 원료로 사용하기에는 높은 수분함량과 낮은 열량, 자연적인 흡습성과 비교적 낮은 밀도 등의 단점으로 인해 바이오매스를 수집, 분쇄, 저장 및 운송을 통해 연료로 사용하는 효율이 낮다. 따라서 초기에 바이오매스는 발전 설비에서 석탄 등과 혼합하여 사용하는 등 첨가연료 형태로 사용되었다[21]. 상기의 바이오매스 연료화 단점을 보완하여 에너지 밀도를 높이기 위해 다양한 바이오매스 전처리 방법들이 개발되었고, 그 중 고품연료화를 위해 주로 반탄화(torrefaction) 또는 펠렛화(pelletization) 두 가지 방향으로 연구가 진행되어왔다. 하지만 펠렛화의 경우 바이오매스를 건조시킨 후 펠렛 공정을 통해 에너지 밀도를 높이는 방식으로 비교적 무게 당 운송단가를 낮출 수 없고 자연적인 흡습성이 제거되지 않아 대기 중

**Table 2. Typical Lignocellulose Content of Biomass[19,20]**

Biomass	Lignocellulose Content (%)		
	Hemicellulose	Cellulose	Lignin
Orchard grass	40.0	32.0	4.7
Rice straw	27.2	34.0	14.2
Birchwood	25.7	40.0	15.7

에 장기간 노출되면 다시 연료의 수분 함량이 높아지는 문제가 발생한다. 반면 반탄화의 경우 산소가 희박한 조건에서 200~300 °C의 조건으로 휘발성분과 섬유질을 적절하게 제거하여 무게 당 에너지밀도와 수소성, 착화성, 반응성 및 과쇄성을 향상시킬 수 있어 상기의 문제를 해결할 수 있다[22].

특히 바이오매스는 반탄화 후 휘발성분(volatile matters)은 감소되고 고정탄소(fixed carbon)는 증가함으로써 단위무게 당 열량의 증가로 에너지밀도가 향상된다. 아울러 반탄화 후에는 산소/탄소 비(O/C) 및 수소/탄소 비(H/C)가 감소되어 가스화 시 합성가스의 열량을 증가시키는 효과를 가진다(Table 3).

목질계와 초본계 바이오매스의 반탄화 후 특성 또한 차이가 발생하는데, Table 4에서 나열한 바와 같이 목질계 바이오매스인 너도밤나무(beech)와 소나무(pine)의 경우 초본계 바이오매스인 백연수(leucaena)와 갈풀(reed canary grass)에 비해 반탄화 후 고정탄소량이 큰 폭 증가하고, 휘발성분량이 감소하며 그에 따라 단위 무게 당 열량이 비교적 더 큰 것을 확인할 수 있다. 아울러 O/C 및 H/C 비 또한 낮아 가스화 연료로 사용되기 적합하다(Table 4).

바이오매스의 열화학적 변환에는 바이오매스를 열분해 가스화하여 발생된 합성가스를 이용해서 1300 °C 이상의 고온으로 용융 처리하는 기술, 바이오매스를 급속히 가열·분해하여 기름 형태의 생성물 또는 고체생성물을 얻는 기술 등이 있다. 열화학적 변환 공정은 탄화수소 물질이 가지고 있는 열량의 대부분을 화학에너지로 전환시킴으로써 전체 공정의 효율 감소가 적은 장점을 가지고 있다. 특히, 연소에 의해 생성되는 가스는 활용도가 낮고 지구온난화를 일으키는 CO<sub>2</sub>를 생

**Table 3. Property Variation of Raw and Torrefied Biomass[4]**

	Moisture	Energy Density	O/C & H/C ratio	Hydrophilicity	Grindability	Uniformity
Raw	Higher	Lower	Higher	Hygroscopic	Poor	Poor
Torrefied	Lower	Higher	Lower	Hydrophobic	Good	Good

**Table 4. A List of Fixed Carbon (Fc), Volatile Matters (Vm), Atomic O/C and H/C Ratios and Higher Heating Values of Various Types of Raw and Torrefied Biomass[4]**

Biomass	T (°C)	t (min)	FC (wt%)	VM (wt%)	O/C	H/C	HHV (MJ/kg)	Ref.
Beech	Raw		16.1	83.3	0.649	1.532	-	[23]
	Torrefied	270	40	22.7	76.3	0.474	1.340	
		290	40	32.4	66.7	0.382	1.131	
Pine	Raw		13.8	86.0	0.727	1.688	18.5	[24]
	Torrefied	225	30	15.0	84.8	0.668	1.472	
		275	30	23.3	76.4	0.521	1.355	
Leucaena	Raw		13.1	86.1	0.626	1.772	20.3	[25]
	Torrefied	200	30	14.0	85.3	0.588	1.648	
		250	30	16.9	82.2	0.565	1.449	
Reed canary grass	Raw		12.1	82.4	0.576	1.679	19.5	[26]
	Torrefied	275	30	24.9	73.8	0.479	1.154	
		290	30	21.3	70.4	0.501	1.348	

**Table 5. Characteristics of Biomass Gasifier**

Type	Fixed bed	Fluidized Bed	Entrained bed
Maker	IISc (IND)	Lurg i(GER)	Koren (GER)
Fuel type	Wood chip	Wood Pellets	Wood Turneries
Heat input (kWt)	200-2,000	2,000-20,000	20,000~
Gasification agent	Air	Air	Oxygen
H <sub>2</sub>	16	10	13
CO	19	20	46
CO <sub>2</sub>	12	14	23
CH <sub>4</sub>	2	5	10
N <sub>2</sub>	51	51	8
Syngas heating value (kcal/m <sup>3</sup> )	1,300	1,500	2,800
Tar (mg/m <sup>3</sup> )	100	small	-
Gasification rate (%)	75	70	66

성시키며 발열량이 낮기 때문에 가스내의 현열이 없어지게 되나 가스화 공정은 바이오매스와 공기, 산소 및 스팀 등을 산화제로 이용하여 열분해, 산화 및 환원 개질반응을 통해 일산화탄소(CO), 수소(H<sub>2</sub>) 및 낮은 탄소수의 탄화수소화합물(Hydrocarbons)과 소량의 질소, 촉 (Char), 회분(Ash) 및 유성분(Oil)을 포함하는 합성가스로 전환하는 공정으로서 물질 자체의 화학에너지가 그대로 유지되므로 전력생산, 화학원료 생산, 연료전지 적용 등이 가능하며, 가스터빈 발전 등을 통해 에너지를 회수 할 수 있는 장점을 가지게 된다[27].

바이오매스 가스화 반응은 흡열반응으로서 열을 가하는 방법 및 산화제 공급 방식에 따라 간접가스화와 직접가스화 방식으로 나눌 수 있으며 가스화로 반응기의 형식, 산화제 종류, 불연물의 용융 여부에 따라 적용 기술을 구분할 수 있고 가스화 원료의 조성과 목적산물에 따라 온도는 약 500~1400 °C, 압력은 약 5~80 bar 사이에서 운전된다 [28]. 가스화에서 가장 중요한 핵심 장치인 가스화기는 주로 방식에 따라 고정층(fixed bed), 유동층(fluidized bed), 분류층(entrained bed)으로 분류된다[29].

산화제는 공기, 산소, 수증기 및 이들이 혼합된 형태로 공급할 수

있으며 1단계에서는 열분해 과정을 통해 가스 및 액체 상태의 탄화수소 형태의 휘발성분을 생성하고 2단계에서는 생성된 촉 및 휘발성분의 탄화수소 연료의 가스화를 통한 합성가스의 생성과정이 진행되게 된다. 바이오매스의 경우 가스화 시 열분해에서 발생하는 가스, 타르, 촉의 생성 비율은 원료의 입경 및 가열속도에 의존하지만 온도가 높을수록 가스 발생량이 많아져 타르, 촉이 적어지게 되며, 스팀에 의한 가스화 반응은 촉 가스화와 수성가스 전환반응을 촉진하여 생성물 중 수소 농도를 높여주게 된다. 특히, 바이오매스 직접 가스화 방식을 적용할 경우 산화제로 산소 또는 수증기를 주로 이용하며 발열량이 5,000~6,000 kcal/m<sup>3</sup>의 중발열량 가스가 되며, 공기를 사용할 경우 합성가스 중 질소 성분이 포함되어 있어 발열량이 3,000 kcal/m<sup>3</sup>이하의 저발열량 가스가 생성된다. 최근, 바이오매스 복합발전 공정은 합성전환 공정이 결합되어 다양한 화학원료 제품을 생산할 수 있는 차세대 기술로서 연료전지, 수소 엔진 등을 이용하여 최대 60%의 고효율을 달성할 수 있기 때문에 에너지문제와 지구온난화 문제를 동시에 해결할 수 있는 기술로 인정받고 있다. 대표적인 바이오매스 가스화로의 특징을 Table 5에 나타내었다.

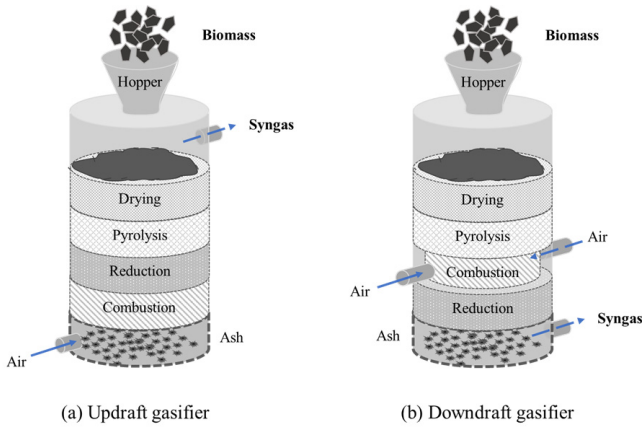


Figure 3. Schematic diagram of biomass fixed bed gasifier: (a) Updraft type (b) Downdraft type.

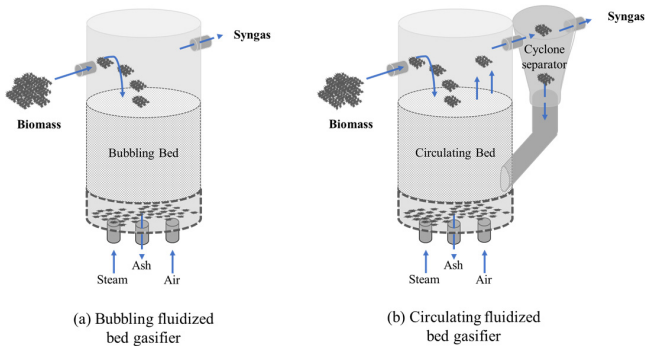


Figure 4. Schematic diagram of fluidized bed biomass gasifier: (a) Bubbling fluidized bed type (b) Circulating fluidized bed type.

고정층 방식의 가스화기는 가스화 원료가 가스화기를 느린 속도로 통과하며 합성가스로 전환되기 때문에 moving bed 방식으로도 불리는데, 생성된 합성가스가 배출되는 방향에 따라 figure 3과 같이 주로 상향류식(updraft, countercurrent)과 하향류식(downdraft, co-current) 두 가지 방식으로 나뉜다[30].

상향류식 가스화기는 간단한 형태에 낮은 제작비용, 높은 열효율을 가지고 화가 적게 발생한다는 장점이 있으나, ash 함량이 높은 원료를 사용했을 때 슬래깅(slagging) 현상과 생성가스 내 타르 함량이 10~20% 정도로 추가적인 후처리 공정이 필요하다는 단점이 있다. 하향류식 가스화기는 상향류식과는 반대로 생성가스가 비교적 높은 온도를 가지는 하단에서 배출되어 0.1% 미만으로 타르 함량이 낮아 후처리 부담이 적다는 장점을 가지고 있으나, 상향류식과 마찬가지로 ash 함량이 높거나 회용점이 낮은 원료 사용 시 슬래깅 및 클링커(clinker)가 생성된다[31]. 교차류식(crossdraft) 형태의 가스화기도 분류되어 있으나 상향류식 및 하향류식에 비해 작동방식이 간단하지 않아 상용설비에는 거의 적용되지 않고 있다.

유동층 방식의 가스화기는 기포유동층(bubbling fluidized bed)과 순환유동층(circulating fluidized bed) 방식으로 나뉘며(Figure 4), 가스화 원료가 유동층화(fluidized) 되어 공기나 산소와 반응해야 하므로 원료를 작게 파쇄 하는 전처리 공정이 필요하다. 유동층 가스화기는 실리카 샌드(silica sand) 등의 불활성물질(inert material)을 혼합하여 반응하므로 열과 원료의 분산이 균일하여 가스화기 모든 부분에서 동시에 반응이 진행된다.

하지만 상기한 유동층 가스화기의 장점에도 불구하고, 유동층 가스화기는 고정층 가스화기에 비해 설치에 있어 요구되는 공간이 커서 한정적인 공간을 갖는 수요처에 적용하는 데 불리함을 가지고 있다. 따라서 유동층 가스화기는 고정층 가스화기보다 합성가스 내 입자상의 불순물의 후처리 부하가 증가하기에 가스상 불순물보다 입자상 불순물에 민감한 SOFC를 활용하는 열병합발전 시스템에 적용하기 위해서는 고정층 가스화기가 적합하다.

### 3. 바이오매스 기반 SOFC 열병합발전 시스템 구성 설계 고려 요인

#### 3.1. 농업부산물 선정

스마트팜 적용을 위한 바이오매스 연계 SOFC 열병합발전 시스템은 분산형 모델로 보급이 가능해야하고 이를 위해서는 농가에서 지속적으로 원활하게 수급이 가능한 농업부산물을 바이오매스 원료를 선정해야 한다. 2017년 통계 기준 농업부산물 발생량 중 대부분은 벃짚(rice straw)과 왕겨(husks)이며 절반 이상인 64%가 발생하지만, 가축의 사료 또는 축분 처리에 활용률이 높아 잉여량이 많지 않아 바이오매스 연료로 활용이 어렵다(Figure 5).

두 번째로 많은 비중을 차지하고 있는 버섯 폐배지(mushroom medium)의 경우 약 11% 정도가 발생되고 있으며, 마땅한 활용처가 없어 안정적인 바이오매스 원료로 활용할 수 있을 것으로 확인된다. 아울러 연료전지 기반 열병합발전 시스템의 연료의 정제 및 고품위화 부담을 줄이기 위해 바이오매스 원료는 황 성분 함량이 낮고, 반탄화 후 연료수율이 높아야하므로 목질계인 톱밥 또는 통나무를 배지로 사용하는 버섯 폐배지가 활용하기에 적합하다.

#### 3.2. 합성가스 정제

가스화공정을 통해 전환되는 합성가스에는 가스화기의 유형에 따라 여러 종류의 불순물이 함유되어있으며, 공급되기 전 가스 정제공정(gas cleaning)을 거쳐야만 한다. 가스 정제공정은 후속공정의 운전 조건에 따라 크게 저온가스 정제공정(cold gas cleaning)과 고온가스 정제공정(hot gas cleaning)으로 분류된다(Table 6).

작동온도가 약 750 °C에 이르는 SOFC 스택을 열병합발전에서 사용하기 위해서는 고정층 가스화기로부터 고온으로 배출되는 합성가스의 열손실 최소화해야하므로 고온 방식의 가스정제공정을 사용해야

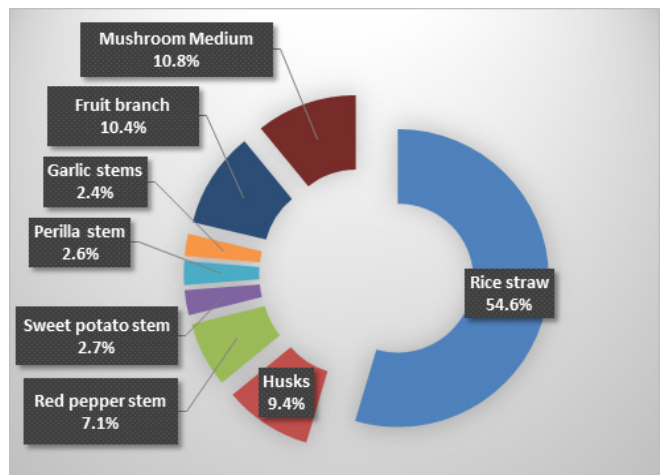


Figure 5. Domestic agricultural by-products in Korea[32].

Table 6. Classification of Gas Cleaning Methods[35]

Gas cleaning	Cold gas cleaning		Hot gas cleaning	
	Dry cleaning	Wet cleaning	Thermal treatment	Catalytic treatment
Type of equipments	Cyclone, Rotating particle separators, Electrostatic precipitators, Bag filters, Baffle filters, Ceramic filters, Fabric/tube filters, Sand bed filters, Absorbers, etc.	Spray towers, Packed column scrubbers, Impingement scrubbers, Venture scrubbers, Wet electrostatic precipitators, Wet cyclones, etc.	Ceramic filter, Candle filter	Primary bed in the gasifier or in the secondary reformer



Figure 9. Gasification system of torrefied biomass using O<sub>2</sub> agent: (a) Torrefied biomass hopper (b) Gasifier (c) Gas cleaner (Ceramic filter) (d) Ash bucket (e) Hot gas blower.

하며, 이를 위해서는 Table 6에 나열된 바와 같이 세라믹 필터(ceramic filter) 또는 캔들 필터(candle filter)를 가스화기 후단과 SOFC 발전 스택 사이에 배치해야 한다.

아울러 바이오매스의 가스화를 위한 가스화제(gasification agent)의 경우 경제성 및 운영의 용이성을 위해 주로 공기를 정제하여 사용하며, 적용되는 합성가스 성상에 따라 공기, 순산소, 수증기, 이산화탄소 등 다양한 가스화제가 사용될 수 있다. 공기를 이용한 가스화의 경우 경제적인 효율은 증가되나 가스화 후 합성가스 내 질소의 함량이 높아 단위 부피 당 열량이 낮고, 유량이 증가되어 공간효율과 연료전지를 이용한 발전 시스템에 활용을 위해서는 이를 분리하고 정제하는 추가 장치가 요구된다. 따라서 연료전지를 포함하는 열병합발전 시스템을 위해서 순산소의 가스화제를 이용하는 것이 합성가스 중 수소와

일산화탄소의 함량을 높이는 방법이다.

### 3.3. SOFC 공급용 바이오매스 가스화기

열병합발전 시스템의 SOFC에 공급할 연료인 합성가스를 생산을 위한 바이오매스의 반탄화 연료 가스화기는 목질계를 반탄화 한 가스화 원료, 고온용 합성가스 정제장치 및 순산소 가스화제를 이용하여 설계를 통해 figure 6과 같이 구성된다. 반탄화 바이오매스는 호퍼[(a) torrefied biomass hopper]에서 로타리-킬른 방식으로 가스화기[(b) gasifier]에 공급되며, 전환된 합성가스는 가스정제장치[(c) gas cleaner]를 거쳐 타르 및 입자상물질을 정제한 후 고온 블로워[(e) hot gas blower]를 통해 연료전지에 공급되고, 정제과정에서 쌓인 회분은 수집부[(d) ash bucket]로 배출된다.

특히 가스화기에서는 합성가스 생산에 있어 유량 최소화와 합성가스 순도를 향상시키기 위해 앞 단에서 언급한 이유로 순산소를 이용하는 것이 바람직하다. 또한 순산소 유입으로 급격히 반응하여 연소가 이뤄지지 않도록 반탄화 연료를 하단에서 밀어올려 상부로 가스화회분이 배출되게 구성하고, 가스화제 유입구를 다단으로 구성하여 반탄화 연료가 적당한 속도로 가스화가 이뤄지게 설계하는 것이 바람직하다.

아울러 SOFC와 연계하여 열효율을 향상시킬 수 있도록 가스냉각 없이 가스의 입자상 불순물을 정제하는 고온가스용 세라믹 필터를 적용시켜 합성가스 배출온도가 500~600 °C 이상으로 유지될 수 있도록 하고, 방열방지를 위해 내화재를 이용하여 정제장치 벽면으로부터 충분히 거리를 두어야 한다.

상용의 블로워는 주로 중저온의 가스를 처리할 수 있도록 설계되어 있어 전단의 고온 합성가스를 SOFC에 공급하기 위해서 내구성을 고려하여 설계해야 한다.

#### 4. 결 론

인프라 시설로부터 거리가 떨어진 농가에 열 및 전기에너지를 공급하기 위한 수단으로 바이오매스, 특히 농업부산물을 활용한 고온형 SOFC를 포함한 열병합발전 시스템은 합성가스 순도에 대한 유연성과 열에너지의 효율적인 활용 측면에서 그 필요성이 대두되고 있다. 하지만 농가라는 독립적인 장소의 한계와 고온을 유지해야 하는 SOFC 특성에 따라 시스템의 각 공정 통합연계를 위해서 몇 가지 고려사항이 존재한다.

먼저 반탄화 공정에서 안정적인 수급이 가능한 농업부산물을 선정해야 하며 선정된 농업부산물은 반탄화 후 원료의 수율과 C/H 비율이 가스화를 통한 연료생산에 적절해야 한다. 가스화 공정에서는 고온에서 운전이 가능한 연료정제기술 도입이 필요하고, 연료전지 공급을 위한 전처리 공정 부담을 줄이기 위해서는 적절한 가스화제 선정을 통해 연료 내 H<sub>2</sub> 및 CO 의 불순물을 저감해야 한다. 아울러 시스템 내 장치 간 효율적인 열에너지 사용을 위해서는 공정모델링을 통해 열교환을 최적화하고, 이를 고려하여 열수지에 맞도록 연료전지의 용량을 일정수준 이상으로 설계해야 한다.

본 논문에서 제시한 통합연계 고려요인들은 농업부산물 기반 SOFC 열병합발전 시스템의 에너지 효율 향상에 있어 핵심기술이라 판단되며, 통합공정 연계기술개발을 통한 총괄 시스템 효율 한계 극복은 국내 연료전지 기반 분산형 열병합발전 시스템의 보급 확대 및 안착을 위한 디딤돌이 될 것이다.

#### 감 사

본 연구는 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜다부처패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (No. 421037031HD020)

#### References

1. Ministry of Foreign Affairs, Climate Change, [https://www.mofa.go.kr/eng/wpage/m\\_5655/contents.do](https://www.mofa.go.kr/eng/wpage/m_5655/contents.do) (2022.06.16.)
2. D. G. Hong, *National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea*

- 2019, Ministry of Environment, Greenhouse Gas Inventory and Research Center, 4-11 (2020).
3. J. G. Kim, Korea Electric Power Corporation, *Statistics of Electric Power in Korea 2020*, No. 90, 26-27 (2021).
4. W.-H. Chen, J. Peng, and X.T. Bl, A state-of-art review of biomass torrefaction, densification and applications, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **44**, 847-866 (2015).
5. R.Ø. Gadsbøll, J. Thomsen, C. Bang-Møller, and J. Ahrenfeldt, Solid oxide fuel cells powered by biomass gasification for high efficiency power generation, *Energy*, **131**, 198-206 (2017).
6. Z. Wu, P. Zhu, J. Yao, S. Zhang, J. Ren, F. Yang, and Z. Zhang, Combined biomass gasification, SOFC, IC engine, and waste heat recovery system for power and heat generation: Energy, exergy, exergoeconomic, environmental (4E) evaluations, *Appl. Energy*, **279**, 115794 (2020).
7. A. Arsalis, M. P. Nielsen, and S. K. Kær, Application of an improved operational strategy on a PBI fuel cell-based residential system for Danish single-family households, *Appl. Therm. Eng.*, **50**, 704-713 (2013).
8. R. J. Braun, S. A. Klein, and D. T. Reindl, Evaluation of system configurations for solid oxide fuel cell-based micro-combined heat and power generators in residential applications, *J. Power Sources*, **158**, 1290-1305 (2006).
9. V. Liso, Y. Zhao, N. Brandon, M. P. Nielsen, and S. K. Kær, Analysis of the impact of heat-to-power ratio for a SOFC-based mCHP system for residential application under different climate regions in Europe, *Int. J. Hydrog. Energy*, **36**, 13715-13726 (2011).
10. A. R. Korsgaard, M. P. Nielsen, and S. K. Kær, Part one: A novel model of HTPeM-based micro-combined heat and power fuel cell system, *Int. J. Hydrog. Energy*, **33**, 1909-1920 (2008).
11. I. Verhaert, G. Mulder, and M. D. Paepe, Evaluation of an alkaline fuel cell system as a micro-CHP, *Energy Convers. Manag.*, **126**, 434-445 (2016).
12. E. Jannelli, M. Minutillo, and A. Perna, Analyzing micro-cogeneration systems based on LT-PEMFC and HT-PEMFC by energy balances, *Appl. Energy*, **108**, 82-91 (2013).
13. A. R. Korsgaard, M. P. Nielsen, and S. K. Kær, Part two: Control of a novel HTPeM-based micro combined heat and power fuel cell system, *Int. J. Hydrog. Energy*, **33**, 1921-1931 (2008).
14. A. Arsalis and M. P. S. K. Kær, Modeling and off-design performance of a 1 kW<sub>e</sub> HT-PEMFC (high temperature-proton exchange membrane fuel cell)-based residential micro-CHP (combined-heat-and-power) system for Danish single-family households, *Energy*, **36**, 993-1002 (2011).
15. A. Adam, E. S. Fraga, and D. J. L. Brett, Options for residential building services design using fuel cell based micro-CHP and the potential for heat integration, *Appl. Energy*, **138**, 685-694 (2015).
16. J. Kupecki, Off-design analysis of a micro-CHP unit with solid oxide fuel cells fed by DME, *Int. J. Hydrog. Energy*, **40**, 12009-12022 (2015).
17. P. Kazempoor, V. Dorer, and F. Ommi, Modelling and performance evaluation of solid oxide fuel cell for building integrated Co- and polygeneration, *Fuel Cells*, **10**, 1074-1094 (2010).
18. A. Arsalis, A comprehensive review of fuel cell-based micro-combined-heat-and-power systems, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **105**, 391-414 (2019).
19. P. J. Van Soest, Symposium on nutrition and forage and pastures: New chemical procedures for evaluating forages, *J. Anim. Sci.*, **23**,

- 838-845 (1964).
20. D. Mohan, C. U. Pittman Jr., and P. H. Steele, Pyrolysis of wood/biomass for Bio-oil: A critical review, *Energy Fuels*, **20**, 848-889 (2006).
  21. M. Sami, K. Annamalai, and M. Wooldridge, Co-firing of coal and biomass fuel blends, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **27**, 171-214 (2001).
  22. W.-H. Chen and P.-C. Kuo, Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass, *Energy*, **36**, 803-811 (2011).
  23. A. Ohliger, M. Förster, and R. Kneer, Torrefaction of beechwood: A parametric study including heat of reaction and grindability, *Fuel*, **104**, 607-613 (2013).
  24. M. Phanphanich and S. Mani, Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass, *Bioresour. Technol.*, **102**, 1246-1253 (2011).
  25. J. Wannapeera, B. Fungtammasan, and N. Worasuwanarak, Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **92**, 99-105 (2011).
  26. B. Arias, C. Pevida, J. Feroso, M. G. Plaza, F. Rubiera, and J. J. Pis, Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass, *Fuel Process. Technol.*, **89**, 169-175 (2008).
  27. Z. Yao, S. You, T. Ge, and C-H. Wang, Biomass gasification for syngas and biochar co-production: Energy application and economic evaluation, *Appl. Energy*, **209**, 43-55 (2018).
  28. J. A. Ruiz, M. C. Juárez, M. P. Morales, P. Muñoz, and M. A. Mendivil, Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **18**, 174-183 (2013).
  29. R. Warnecke, Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier, *Biomass Bioenergy*, **18**, 489-497 (2000).
  30. R. Thomson, P. Kwong, E. Ahmad, and K. D. P. Nigam, Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation, *Int. J. Hydrog. Energy*, **45**, 21087-21111 (2020).
  31. F. Pinto and R. N. André, The role of gasification in achieving almost zero emissions in energy production from coal. In: R. Kumar (ed.). *Fossil Fuels: Sources, Environmental Concerns and Waste Management Practices*, 145-198, Nova Science Publishers, NY, USA (2013).
  32. N.-H. An, S.-M. Lee, J.-R. Cho, and C.-R. Lee, Estimation of agricultural by-products and investigation on nutrient contents for alternatives of imported oil-cakes, *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.*, **27**, 71-81 (2019).
  33. A. Paethanom, S. Nakahara, M. Kobayashi, and P. Prawisudha, Performance of tar removal by absorption and adsorption for biomass gasification, *Fuel Process. Technol.*, **104**, 144-154 (2012).
  34. G. Akay, C. A. Jordan, and A. H. Mohamed, Syngas cleaning with nano-structured micro-porous ion exchange polymers in biomass gasification using a novel downdraft gasifier, *J. Energy Chem.*, **22**, 426-435 (2013).
  35. M. Asafullah, Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **40**, 118-132 (2014).

#### Authors

- Gi Hoon Hong; Ph.D., Senior Researcher, Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin-si 17180, Korea; run1600@iae.re.kr
- Sunghyun Uhm; Ph.D., Principal Researcher, Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin-si 17180, Korea; electrik@iae.re.kr
- Sangyeon Hwang; Ph.D., Senior Researcher, Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering, Yongin-si 17180, Korea; syhwang@iae.re.kr