

농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 시스템 열교환망 최적화

†홍기훈 · 엄성현 · 정형준* · 황성원**

고등기술연구원 수소에너지솔루션센터, *인하대학교 학생연구원, **인하대학교 교수
(2023년 12월 13일 접수, 2023년 12월 21일 수정, 2023년 12월 27일 채택)

Optimization of Heat Exchange Network of SOFC Cogeneration System Based on Agricultural By-products

†Gi Hoon Hong · Sunghyun Uhm · Hyungjune Jung* · Sungwon Hwang*

Hydrogen Energy Solution Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28, Goan-ro
51beon-gil, Baegam-myeon, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

*Department of Chemistry and Chemical Engineering Education and Research Center for
Smart Energy and Materials, Inha University, South Korea

(Received December 12, 2023; Revised December 21, 2023; Accepted December 27, 2023)

요약

본 연구에서는 농업 분야 에너지 자립 시스템 기술도입의 일환으로 농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 시스템의 공정 모사 모델을 구축하고 열교환망 최적화를 진행하였다. 0.3 ton/d급 농산부산물 반탄화 연료 가스화기 실험 결과를 기반 농산부산물 SOFC 열병합발전 시스템 모델을 구축하여 4~20 kW급 SOFC 발전 용량별 열교환망 최적화를 진행하였다. 현재 시스템상에서 8 kW급 농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 시스템이 최적으로 도출되었으며, 본 연구 결과를 기반으로 추후 상용 설비 설계 시 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract - In this study, we constructed a process simulation model for an agricultural by-products based Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) combined heat and power generation system as part of the introduction of technology for energy self-sufficiency in the agricultural sector. The aim was to reduce the burden of increasing fuel and electricity consumption due to rapid fluctuations in international oil prices and the expansion of smart farming in domestic farms, while contributing to the national greenhouse gas reduction goals. Based on the experimental results of 0.3 ton/day torrefied agricultural by-product gasification experiment, a model for an agricultural by-product-based SOFC cogeneration system was constructed, and optimization of the heat exchange network was conducted for SOFC capacities ranging from 4 to 20 kW. The results indicated that an 8 kW agricultural by-product-based SOFC cogeneration system was optimal under the current system conditions. It is anticipated that these research findings can serve as foundational data for future commercial facility design.

Key words : agricultural by-products, SOFC cogeneration, heat exchange network optimization, smart-farm, process optimization

I. 서론

국내 농업분야의 에너지 소비량의 대부분은 화석

연료와 전기에너지에 집중되어 있으며, 특히 토마토 및 오이 등 과채류 농가에서는 비닐하우스의 가온용도로 경유, 등유 및 병커씨유의 사용량이 높다(Fig. 1)[1].

지난 20년간 우리나라 원예시설 면적은 2.1배 증가한 반면 난방면적은 7.4배 증가함에 따라 유류소비

†Corresponding author:run1600@iae.re.kr
Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

늘어나 경영비 중 30~40%를 차지한다. 2020년 40달 러정도였던 국제원유가가 2022년 두배가 넘는 90달러 후반까지 치솟으면서 급격한 국제유가 변동에 농가경영 악화의 원인이 되고 있다[2].

아울러 면적 대비 농작물 수확 효율 향상을 위해 스마트팜의 확산 및 보급이 증가하고 있고, 지속가능한 탄소중립적 스마트팜 운영을 위하여 기존 화석에너지 기반 운영에서 전기에너지 기반 운영으로 전환하고 있어 농업분야 전력사용량이 증가하는 추세이다 (Fig. 2)[3,4]. 하지만 국내 스마트팜 기술은 초기 도입 수준으로 에너지 사용효율이 낮아 보완할 수 있는 기술 모색이 필요하다.

농가의 유류 및 전기 사용량 증가에 따른 면세유 및 농사용 전력 정부보조금액 절감과 유가상승 및 국가 차원의 온실가스 감축 목표에 부응하기 위한 수단으로 농업분야 에너지 자립 시스템 도입이 해결방안이 될 수 있다.

국내 농업분야 에너지 시스템을 다룬 연구로는 김태호 등은 시설원예농가의 신재생에너지 도입에 대한 가능성을 지열 및 태양광 시설 적용 경제성 분석을 진행한 결과 면적 대비 에너지비용을 감당하지 못하

여 정책지원이 필수적이라는 결론을 도출하였다[5]. 오수빈 등은 지속가능한 농촌사회 유지 및 에너지전환의 방안으로 영농형 태양광 도입에 대한 가능성을 확인하였다. 영농형 태양광은 토지 이용 효율을 높이면서 농의소득을 얻을 수 있다는 장점을 가지나 마찬가지로 정책지원이 동반되지 않으면 유지되지 못한다고 판단하였다[6]. 이상원 등은 신재생에너지의 농업분야 활용 사업모델의 경제성 분석을 진행하고 이를 기반으로 정책적 관점에서 정부보조금 지원이 확대되어야 한다는 결론을 도출하였다[7].

원예시설 모델링을 기반으로 시뮬레이션을 통해 에너지 효율을 향상한 연구도 진행되고 있다. 이승현 등은 TRNSYS 프로그램을 이용하여 반밀폐형 온실을 모델링하고 동적 에너지 부하 분석을 통해 10년 평균의 냉난방 부하 용량을 도출하였다[8]. 구자빈 등은 EnergyPlus 프로그램을 활용하여 스마트팜 온실의 식물의 증발산을 포함한 모델링을 통해 냉방 패키지 케이스에 따른 온실 온도 거동을 모사 조건 내 최적 케이스를 도출하였다[9].

상기한 바와 같이 기존 문헌에서는 경제성분석을 통한 신재생에너지 도입여부나 에너지 만을 고려한 시뮬레이션이 대부분으로 농산부산물의 고부가가치를 염두한 에너지 공급 시스템은 다루지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 농산부산물의 신재생에너지 생산 기술 적용을 위해 반탄화 및 가스화를 포함하여 화학적 전환을 통해 합성가스를 생산하고 이를 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)에 공급하여 열병합발전으로 스마트팜에 전기 및 열에너지를 공급하는 공정의 열교환망 최적화를 진행하여 농가의 에너지 부담 저감에 기여하고자 한다.

II. 공정 모델링

2.1. 농산부산물 SOFC 열병합발전 시스템

스마트팜에 전기 및 열에너지를 공급하는 농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 시스템의 구성은 다음과 같다(Fig. 3).

농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 공정 구성은 크게 6가지로 나눌 수 있다.

- 1) 농산부산물 반탄화 장치
- 2) 반탄화 연료 가스화 장치
- 3) 수성가스 전이반응 장치
- 4) 합성가스 SOFC 연료전지발전 장치
- 5) 흡착식 냉동 장치
- 6) 오프가스 버너, 열교환 장치 등

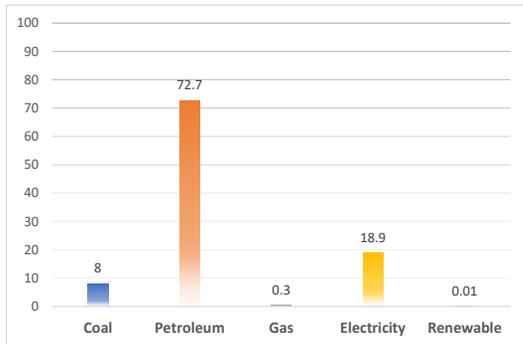


Fig. 1. Energy consumption ratio by energy source in agriculture sector, Korea (2009)[1].

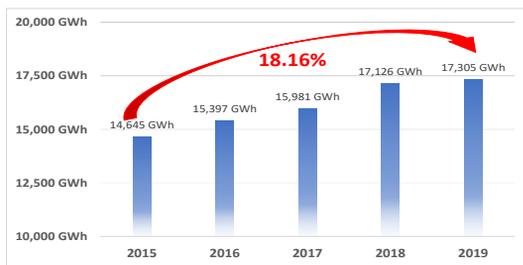


Fig. 2. Electricity demand of agriculture, forestry and fisheries sector in Korea (2020)[3].

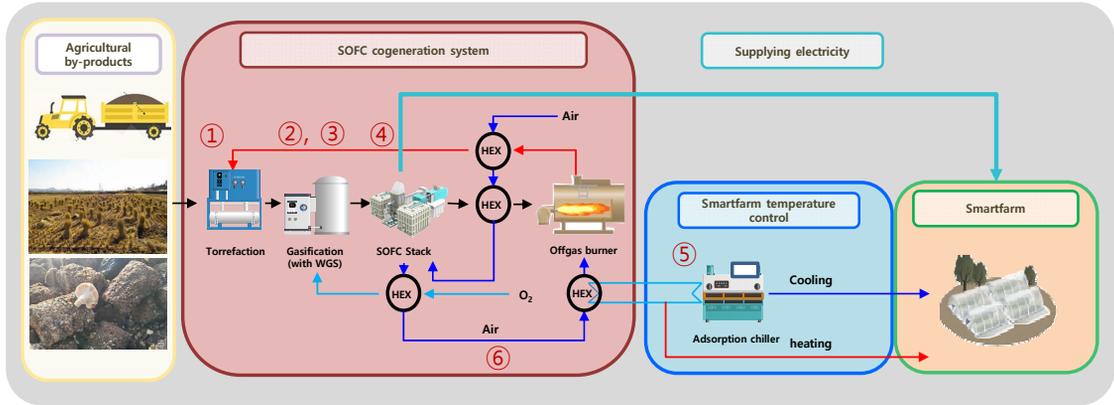


Fig. 3. SOFC cogeneration system based on agricultural by-products.

1) 농산부산물을 반탄화 장치에 투입할 적정 함수율 조건까지 건조시켜 반탄화 장치에서 약 200-300 °C 정도 온도에서 에너지밀도를 향상시켜 반탄화 연료를 생산한다.

2,3) 생산된 반탄화 연료는 가스화 장치에서 순산소 가스화에 의해 합성가스로 전환되고 수성가스 전이반응 장치에서 일산화탄소 일부를 물과 반응시켜 SOFC 연료전지발전 장치 운전에 최적화된 합성가스 비율로 전환시킨다.

4,5) 최적화된 합성가스는 SOFC 연료전지발전 장치에 공급되어 전기에너지를 생산된다. 생산된 전기 에너지는 스마트팜 시설에 공급되고 일부는 흡착식 냉동 장치를 통해 냉방에 사용된다.

6) SOFC 연료전지발전 장치에서 배출되는 미반응 합성가스는 열교환 장치를 통해 고온의 열에너지를 회수하고 오프가스 버너에서 연소되어 추가 열에너지를 발생한다. 회수 및 추가로 발생된 열에너지는 스마트팜 시설 난방과 반탄화 및 가스화 장치의 운전 열원으로 공급되어 외부의 열에너지 공급 없이 시스템이 운영되도록 Balance of Plant (BoP)를 구성하였다.

2.2. 공정 시뮬레이션 틀

본 연구에서는 농산부산물 기반 SOFC 연료전지 열병합발전 시스템 공정의 모델 초안을 상용 공정 시뮬레이션 틀인 Unisim Design R480을 통해 구축하고, 열교환망의 편차 분석 및 최적화는 Aspen HYSYS V11과 AEA (Aspen Energy Analyzer)를 사용하였다. 공정모델은 반탄화 연료의 가스화를 통한 합성가스

공급단부터 흡착식 냉동기 전력 공급까지로 범위를 정하여 모델링을 진행하였다.

아울러 각 열교환망의 capital cost는 AEA에서 제공하는 capital cost index를 사용하였으며 열교환면적, 설계압력 factor, 열교환기 factor 및 설치 factor 등을 적용하여 capital cost를 산출하였다[10-13].

$$Capital\ cost = a + b \times A^c \quad (1)$$

2.3. SOFC 연료전지발전 장치 모델링

농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 시스템의 연료전지 모델링은 과전압의 영향은 없다고 가정하여 연료이용률만을 고려하였다.

$$P_{total} = I_{total} \times V_{cell} \quad (2)$$

$$V_{cell} = 0.895 V$$

$$Syngas\ consumption = \frac{I_{total}}{2F} \quad (3)$$

$$F = 96,485 J/V \times mol$$

$$Required\ syngas = \frac{\frac{Syngas\ consumption}{f}}{X_{H_2} + X_{CO}} \quad (4)$$

SOFC 연료전지에 공급되는 합성가스의 조성을 적용하기 위해 0.3 ton/d급 농산부산물 반탄화 연료 가스화 설비(Fig. 4) Pilot 실험 결과의 출구 조건을 사용하였고 Table 1에 나열하였다. 가스화 설비는 합성가스 순도 향상을 위해 산화제는 순산소로 선정하여 가스화를 진행하였고, 합성가스는 실제 생성량인 20 Nm³/h의 유량으로 적용하였다.

2.4. 수성가스 전이반응 모델

반탄화 연료의 가스화로부터 생산되는 합성가스는 일산화탄소:수소가 약 2.2:1 정도로 SOFC 연료전지발전 장치의 안정화 연료조건인 55:45[14]보다 일산화탄소의 비율이 높아 수소 비율을 높이기 위해 수성가스 전이반응(Water gas shift reaction, WGS)을 도입하였다.

수성가스전이반응은 운전온도에 따라 고온수성가스전이반응(High temperature WGS)과 저온수성가스전이반응(Low temperature WGS)으로 나뉘며 아래의 kinetic 모델을 적용하였다.

1) High temperature water gas shift reaction[15]

$$\ln(K_{HTS}) = \frac{5693.5}{T} + 1.077 \ln T + 5.44 \times 10^{-4} T - 1.125 \times 10^{-7} T^2 - \frac{49170}{T^2} - 13.148 \quad (5)$$

2) Low temperature water gas shift reaction[16]

$$\ln(K_{LTS}) = \frac{2180.6}{T} + 0.0003855 T - 2.4198 \quad (6)$$

2.5. 통합 공정 모델: Base Case

농산부산물 반탄화 연료 가스화 기반의 SOFC 열병합발전 공정의 열교환량 최적화 진행을 위해 4 kW급 SOFC를 최소로 base case 모델(Fig. 5)을 구축하였다.



Fig. 4. 0.3 ton/d class torrefied agricultural by-product fuel gasifier.

Table 1. Syngas composition of gasification of torrefied agricultural by-product

Syngas components	Ratio (Dry basis)
CO	54.89%
H ₂	25.03%
CO ₂	18.48%
CH ₄	1.51%

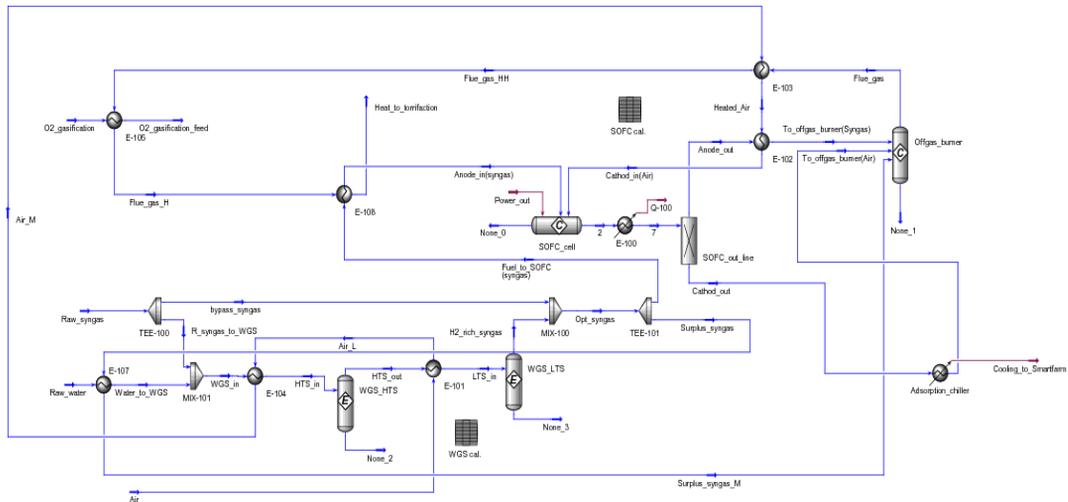


Fig. 5. Base case model(4 kW SOFC stack) of SOFC cogeneration process based on agricultural by-products.

Base case는 폐열회수 및 오프가스 버너 열회수를 통해 공정의 필요 열원을 공급하기 위해 아래의 열교환기들을 적용하여 모델을 구성하였다.

- 1) 연료전지 공급 공기 열교환 장치
 - ① E-101: HTS-LTS 흐름 열회수
 - ② E-102: Anode out-Offgas in(Syn) 흐름 열회수
 - ③ E-103: Flue gas-Flue gas HH 흐름 열회수
 - ④ E-104: WGS in(mix)-HTS in 흐름 열공급
- 2) 가스화 공급 순수 산소 열교환 장치
 - ① E-105: Flue gas HH-Flue gas H 흐름 열회수
- 3) WGS 공급 순수 열교환 장치
 - ① E-107: 잉여가스-잉여가스 버너 흐름 열회수
- 4) 연료전지 공급 합성가스 열교환 장치
 - ① E-108: Flue gas H-반탄화 공급 흐름 열회수

III. 열교환망 최적화

3.1. 농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 공정 열교환망 최적화

구성된 Base case 모델을 기준으로 연료전지의 발전량을 변화시키면서 열교환망 최적화를 진행하였다. 열교환망 최적화 case가 과도하게 생성되는 것으로 방지하기 위해 열교환망 최적화의 열교환기 설계 기준을 아래와 같이 설정하였다.

- 1) 열교환기 설계 시 ΔT_{min} 을 10 °C로 적용
- 2) 열회수를 위한 Split은 최대 2개 흐름까지 생성

3.2. Case I: 4 kW

4 kW 용량의 농산부산물 SOFC 열병합발전 시스템 열교환망 최적화 결과 열교환기 8개, 열교환면적 2.702 m², 추가 활용가능 열량 34.36 kW로 도출되었다(Fig. 6 and 7). 4 kW급 모델의 경우 합성가스 잉여량

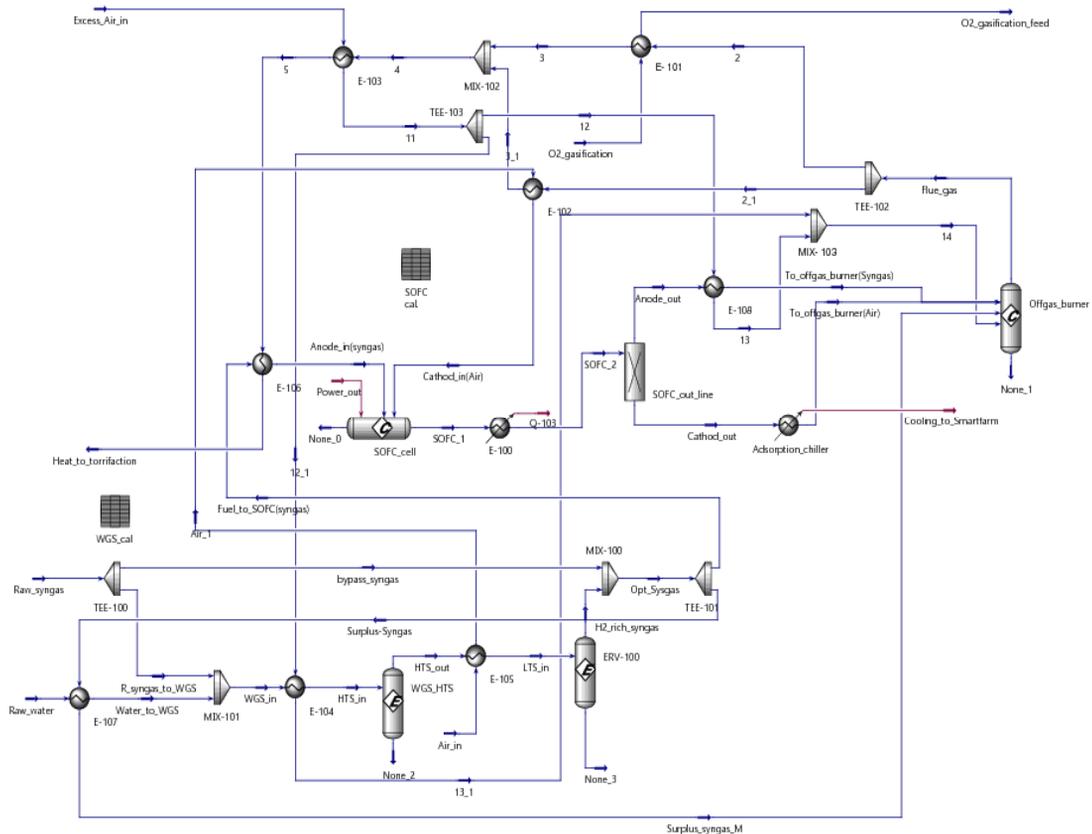


Fig. 6. Optimized 4 kW SOFC cogeneration heat exchange network model.

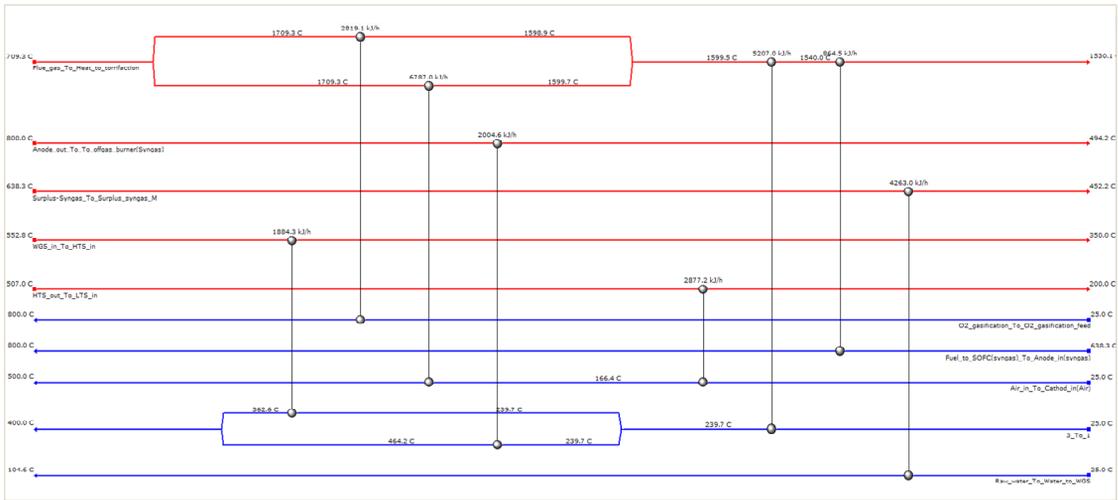


Fig. 7. Grid diagram of optimized 4 kW SOFC cogeneration heat exchange network model.

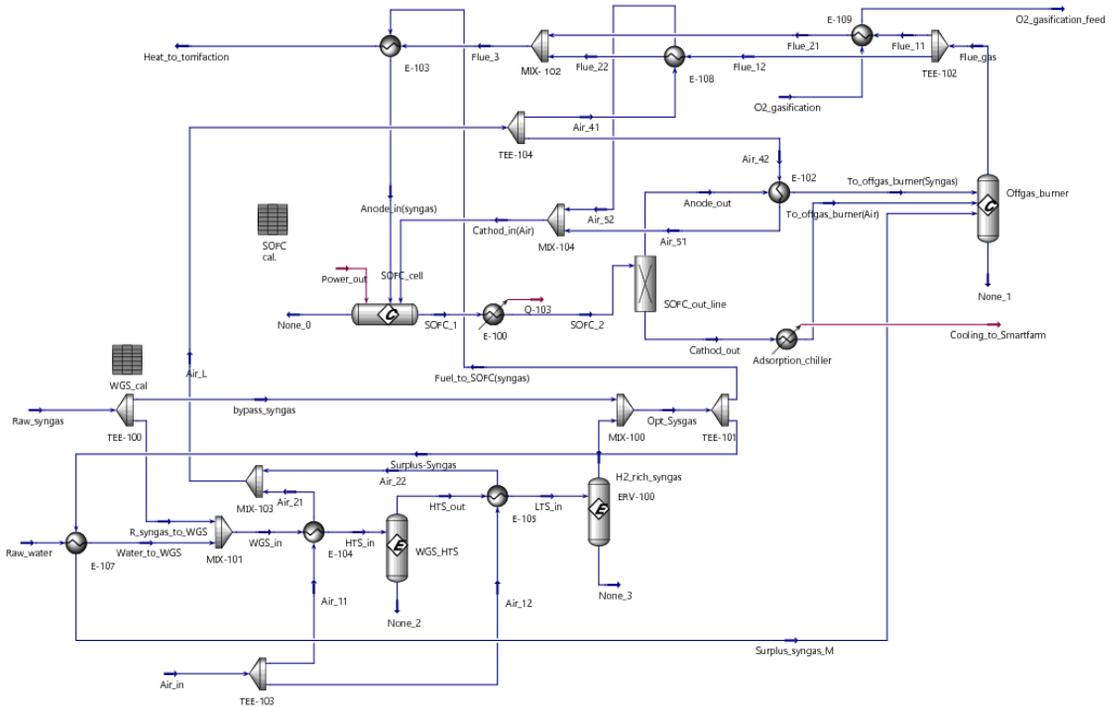


Fig. 8. Optimized 12 kW SOFC cogeneration heat exchange network model.

이 많아 완전 연소를 위해 추가 공기 공급이 필요하여 오프가스 버너 필요공기량의 120%를 적용하여 열교환망 최적화를 진행하였다. 오프가스 버너의 안정적인 운영을 위해 추가공기를 400 °C 까지 승온시키는 열

교환망을 추가하였다.

3.3. Case II: 12 kW

12 kW 용량의 농산부산물 SOFC 열병합발전 시스템

농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 시스템 열교환망 최적화

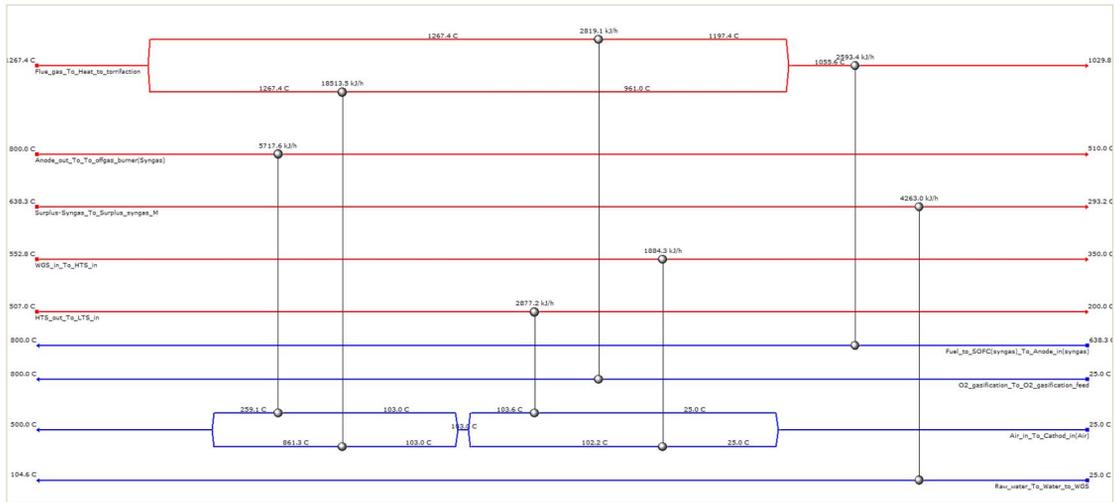


Fig. 9. Grid diagram of optimized 12 kW SOFC cogeneration heat exchange network model.

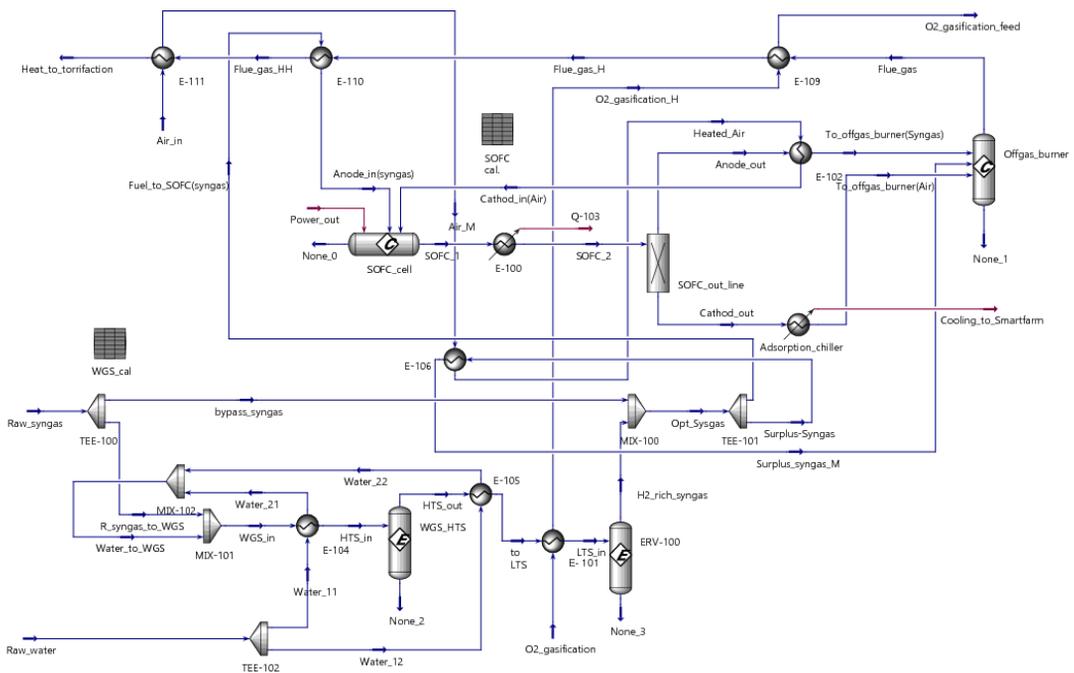


Fig. 10. Optimized 20 kW SOFC cogeneration heat exchange network model.

템 열교환망 최적화 결과 열교환기 7개, 열교환면적 3.816 m², 추가 활용 가능 열량 27.48 kW로 도출되었

다(Fig. 8 and 9). 12 kW급 모델의 경우 연료전지에서 합성가스를 적절히 소모하여 오프가스 버너 추가 공

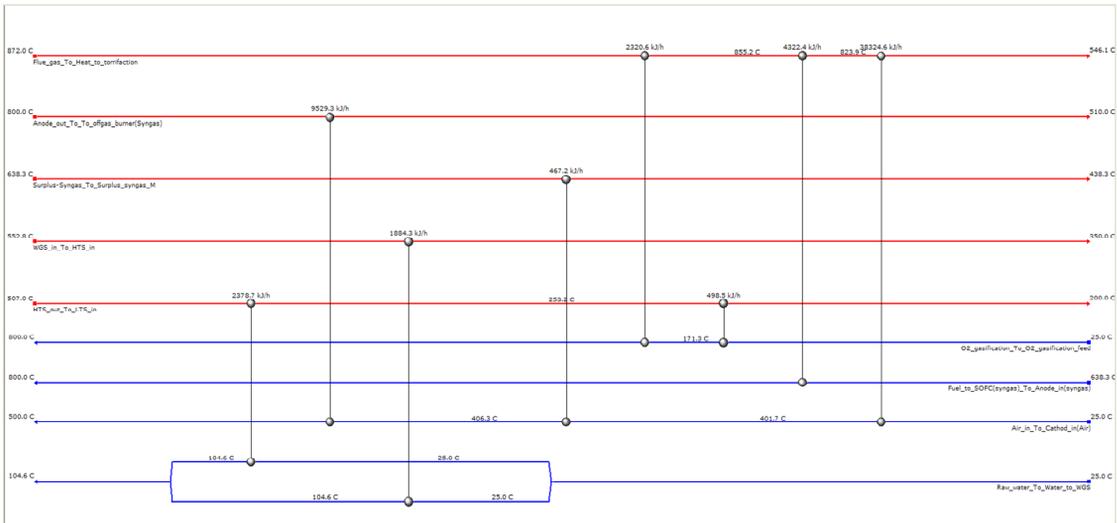


Fig. 11. Grid diagram of optimized 20 kW SOFC cogeneration heat exchange network model.

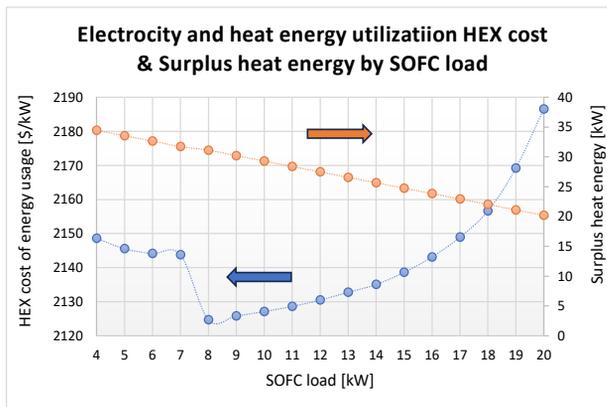


Fig. 12. Electrocity and heat energy utilization heat exchange network cost & Surplus heat energy by SOFC load.

기 공급이 필요하지 않았다. 4 kW급 모델 대비 열량이 높은 흐름이 없어 SOFC Cathode 측 공기 흐름을 여러 차례 split하여 열교환이 필요함을 확인하였다.

3.4. Case III: 20 kW

20 kW 용량의 SOFC 열병합발전 시스템 열교환망 최적화 결과 열교환기 8개, 열교환면적 11.41 m², 추가 활용 가능 열량 20.21 kW로 도출되었다(Fig. 10 and 11). 20 kW급 모델의 경우 잉여 합성가스의 양이 매우 적어 열교환면적이 급격히 증가함을 보였다. 아울러

최적화된 20 kW급 농산부산물 SOFC 열병합발전 모델은 8~20 kW급 시스템에서 활용이 가능하여 4, 12, 20 kW 3가지 case 중 가장 넓은 범위에서 동작함을 확인하였다.

3.5. 농산부산물 기반 분산형 열 및 전기에너지 공급시스템 최적화

최적화된 4~20 kW급 SOFC 열병합발전 시스템의 전기에너지와 추가 열에너지 사용 가능량과 열교환망 구축 비용을 비교하기 위해 factor를 구성하였다.

$$\text{Heat Exchange Network (HEN)} \quad (7)$$

cost of energy usage =

$$\frac{\text{Electricity} + \text{Surplus heat energy}}{\text{Cost of HEN}}$$

7 kW 연료전지 용량 이하에서는 잉여 합성가스의 완전연소를 위한 추가 공기 공급으로 열교환망 비용이 증가함을 보이고 이로 인해 7~8 kW 연료전지 용량 사이에서 큰 차이를 확인할 수 있었다. 아울러 8~13 kW 연료전지 용량까지는 전기 및 열에너지 사용 가능량 대비 열교환망 비용이 선형적으로 증가하나 이후부터는 잉여 합성가스 양이 적어지면서 열교환 면적이 증가하여 지수함수적으로 증가함을 보였다(Fig. 12).

IV. 결론

본 연구에서는 0.3 ton/d급 가스화기 실험결과 기반 농산부산물 SOFC 열병합발전 시스템 모델을 구축하여 4~20 kW급 SOFC 발전 용량별 열교환망 최적화를 진행하였다. 최적화 결과 저용량 구간에서 추가로 사용 가능한 열에너지가 많으나 잉여 합성가스의 완전연소를 위한 추가 공기 공급 및 열교환망 구성이 필요하고, 고용량 구간에서는 열회수량의 극대화가 가능하나 열교환 면적 증가로 비용이 급증함을 확인할 수 있었다. 현 시스템 상에서 8 kW급 농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 시스템이 최적적으로 도출되었다.

본 연구를 통해서 농산부산물을 기반으로 0.3 ton/d급 가스화 설비 기반의 SOFC 열병합발전 시스템의 확장성을 확보할 수 있었고, 추후 탄산화 및 기타 유틸리티 적용으로 상세모델을 구축한다면 상용화 과정에서 설계 기반 자료로써 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연계개발사업단의 스마트팜 다부처패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음.(421037033HD020)

사용기호

E_{ai} : Activation energy of reaction [kJ/mol]
 P_{total} : Electric power of SOFC stack [W]
 $K_{HTS,LTS}$: Equilibrium constant of WGS reactions
 F : Faraday constant [J/V·mol]

f : Fuel utilization factor
 X_i : Gas composition
 A : Heat exchange area
 b : Heat exchanger coefficient
 a : Minimum for MER
 P_j : Partial pressure of component j [kPa]
 I_{total} : Intensity of SOFC stack [A]
 r_i : Reaction rate of reaction i [mol/g_{cat} min]
 c : Sizing factor
 T : Temperature [K]
 V_{cell} : Voltage of SOFC cell [V]
 I : CO, H₂, CH₄ and H₂O

REFERENCES

- [1] 에너지관리공단, 신재생에너지 보급 통계 2010
- [2] Park J. and Kim Y., "The effects of renewable energy in agricultural sector", *J. Korea Acad.-Ind. Coop. Soc.*, **20**(1), 224-235, (2019)
- [3] 한국전력공사, "한국전력통계" 2020 Statistics of Electric Power in Korea, *Korea Electric Power Corporation*
- [4] Hong G. H., Uhm S., and Hwang S. Y., "Biomass gasification for fuel cell combined-heat-and-power systems", *Appl. Chem. Eng.*, **33**(4), 335-342, (2022)
- [5] Kim T.-H., and Yoon S.-Y., "Evaluation of applicability of renewable energy in controlled horticulture farms -Centering on economic analysis of geothermal-Solar powered-", *Korean J. Org. Agric.*, **20**(3), 267-282, (2012)
- [6] Oh S., Shin S., and Yun S.-J., "Possibilities and issues of agrophotovoltaics as a strategic niche for energy transition and a sustainable rural society", *Space Environ.*, **31**(4), 122-170, (2021)
- [7] Lee S., and Cho Y., "Economic feasibility analysis of the renewable energy based business model in the agricultural sector and policy implications - Focusing on the 'Smart Farms' using renewable energy", *Innov. Stud.*, **15**(1), 1-28, (2020)
- [8] Lee S.-H., Kim R.-W., Kim C.-M., Seok H.-W., and Yoon S., "Optimal capacity determination of hydrogen fuel cell technology based trigeneration system and prediction of semi-closed greenhouse dynamic energy loads using building energy simulation", *J. Bio-Environ. Control*, **32**(3), 181-189, (2023)
- [9] Goo J.-B., Shin H.-J., Kwak Y.-H., and Huh J.-H.,

- “Development of smart greenhouse energy analysis model and analysis of cooling packages performance”, *J. Korean Sol. Energy Soc.*, **41**(6), 1-18, (2021)
- [10] Corripio A.B., Chrien K.S., and Evans L.B., “Estimate costs of heat exchangers and storage tanks via correlations”, *Chem. Eng.*, **82**(2), 125-127, (1982)
- [11] Ahmad S., “Heat exchanger networks: cost trade-offs in energy and capital”, Ph. D. thesis, *Manchester university*, (1985)
- [12] Mulet A., Corripio A.B., and Evans L.B., “Estimate costs of pressure vessels via correlations”, *Chem. Eng.*, **88**(20), 145-150, (1981)
- [13] Cotrim S. L., de Araujo M.A., Leal G.C.L., Vladimir C.G.E., Ravagnani M.A.S.S., “Parameters for cost estimation in shell and tube heat exchangers network synthesis: A systematic literature review on 30 years of research”, *Appl. Therm. Eng.*, **213**, 118801, (2022)
- [14] Yi J. and Anil V., “Fuel composition and diluent effect on gas transport and performance of anode-supported SOFCs”, *J. Electrochem. Soc.*, **150**(7), A942-A951, (2003)
- [15] Chinchin G. C., Denny P. J., Jennings J. R., Spencer M. S., and Waugh K. C., “Synthesis of methanol”, *Appl. Catal.*, **36**, 1-65, (1988)
- [16] Callaghan C. A., “Kinetics and catalysis of the water-gas-shift reaction: A microkinetic and graph theoretic approach”, Ph. D. thesis, *Worcester Polytechnic Institute*, (2006)