



미이용 산림바이오매스 유래 바이오원유 가스화 전산해석 연구

최명규¹⁾ · 최항석^{2)*}

CFD Modeling of Gasification of Biocrude-oil from Waste Forest Biomass

Myung Kyu Choi¹⁾ · Hang Seok Choi^{2)*}

Received 19 February 2025 Revised 6 March 2025 Accepted 6 March 2025 Published online 25 March 2025

ABSTRACT This study investigated the utilization of waste forest biomass in South Korea by producing biocrude-oil and syngas through gasification. The physical and chemical properties of the biomass were analyzed, and computational fluid dynamics (CFD) simulations were conducted to optimize a 1 kg/h biocrude-oil gasification reactor. Results indicated that the biomass had high volatile content and calorific value, making it suitable for biocrude-oil production. CFD analysis revealed that an oxidizer flow rate of 11 L/min ensured optimal bio-oil atomization. Simulation of the gasification process conducted at equivalence ratios of 0.2–0.4 and a reaction temperature of 1,273 K produced syngas compositions consistent with those obtained in other studies, thus validating the computational model. Overall, these findings contribute to sustainable energy development and carbon neutrality by enhancing the utilization of waste forest biomass in South Korea. Future research will integrate this model with experimental validation to improve its accuracy.

Key words Gasification(가스화), Waste forest biomass(미이용 산림바이오매스), Biocrude-oil(바이오원유), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

1. 서론

국내 산림바이오매스는 전국적으로 침엽수림, 활엽수림, 혼효림이 약 1/3 씩 고루 분포되어 있으며, 미활용 바이오매스의 발생량은 산림청 임업통계연보의 임목벌채 허가실적에 의해 2019년에 220,177 ton에서 2021년에는 829,399 ton(총 벌채량의 20.3%)으로 지속적으로 증가하는 추세이

나,^[1] 수거비용의 과다 등으로 활용되지 못하고 임지에 방치되거나 버려지는 실정이다. 이에 산림청에서는 산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률¹⁾에 따라 고시된 산림바이오매스 에너지의 이용·보급 촉진에 관한 규정²⁾을 일부 개정하여 미이용 산림바이오매스의 범위를 확대하여 미이용 산림바이오매스를 본격적으로 활용코자 하였다. 정부에서는 벌채산물 중 원목규격에 못 미치거나 수집이 어려워 이용이 원활하지 않은 미이용 산림바이오매스를 2018년 ‘신재생에너지 공급인증(REC)’ 가중치를 상향 조정함으로써 발전용 원료로서의 가격 경쟁력을 높였으나 최근 2024년 4차 REC 가중치 정기 개편에서 신규 발전설비에 한해 미이용 산림바이오매스 REC 가중치를 폐지하였다. 따라서 미활용 바

1) Ph. D. Student, Division of Environment and Energy Engineering, Yonsei University

2) Professor, Division of Environment and Energy Engineering, Yonsei University

*Corresponding author: hs.choi@yonsei.ac.kr

Tel: +82-33-760-2485

Fax: +82-33-760-2582

이오매스의 원활한 처리를 위해서 발전소 연료 외에 다른 활용 방안이 필요한 실정이다.

Table 1은 국내 지역별 산림면적을 나타내었다. 우리나라의 산림면적은 총 6,287,325 ha로 국토면적의 약 63%가 산지로 이루어져 있고 지역별로 다양하게 분포하고 있어 경제성을 확보하기 위해서는 바이오매스의 수집, 운반비용을 세밀히 고려해야 하는 상황이다.^[2]

본 연구에서는 미이용 산림바이오매스의 활용방안으로 이동식 열분해 시스템을 개발하여 미이용 산림바이오매스 생산지에서 바이오원유를 생산하여 에너지 밀도를 높이고, 바이오원유를 한 곳으로 모아 중앙식 가스화 플랜트를 통한 합성가스(Syngas) 생산 및 발전 공정을 고려하였다. 주로 공기를 가스화제로 이용해 생산되는 합성가스는 엔진, 보일러, 가스터빈 등의 기존 연소기기에 기존연소와의 혼소 또는 전소 형태로 활용되어 전기 및 열을 생산하는 용도로 활용될 수 있다. 더욱이 증기 또는 산소를 가스화제로 할 경우 공기에 비해 높은 발열량을 가지는 합성가스 생산이 가능하며 적절한 정제 공정 및 조성제어 공정을 거쳐 합성천연가스, FT 디젤, 메탄올, 에탄올, 수소 등의 고부가

합성연료 생산이 가능하다.

Table 2와 같이 바이오매스 직접 가스화의 TCI(Total Capital Investment; 바이오매스 2000 t/day 처리 기준)는 560 \$million 이고, 바이오원유 가스화의 TCI는 510 \$million 으로 바이오원유 가스화가 경제적으로 유리할 수 있다는 연구결과를 확인할 수 있다.^[3] 특히, 바이오가스화 시 생성되는 타르 또는 Soot이 바이오가스화의 상용화를 저해하는 주요 요인이며, 타르, Soot 발생으로 인하여 연소 시스템 운전 시 합성가스 정제를 위한 세척 또는 집진 설비의 부담이 증가하기 때문이다. 가스엔진에 합성가스를 사용하는 경우 일반적으로 타르 농도는 100 mg/m³, 입자상 물질은 50 mg/m³ 이하로 유지하여야 한다고 알려지고 있으나 바이오원유 가스화 기술은 바이오매스 가스화 기술보다 합성가스 내 타르 농도가 낮고, 수소와 일산화탄소의 수율이 높기 때문에 고품질의 합성가스 생산이 가능한 것으로 확인되었다.^[4]

따라서 본 연구에서는 먼저 국내에서 발생하는 미이용 산림바이오매스 및 이동식 열분해 시스템을 통해 생산된 미이용 산림바이오매스 바이오원유의 분석을 통하여 물질치 데이터베이스를 구축하였다. 그리고, 바이오원유 가스화 반응기의 최적 설계를 위하여 CFD 시뮬레이션을 이용

Table 1. Forest area by province in South Korea

Classification	Forest area (ha)
Seoul	15,335
Busan	34,892
Daegu	94,296
Incheon	39,074
Gwangju	18,926
Daejeon	29,738
Ulsan	67,932
Sejong	24,779
Gyeonggi	508,788
Gangwon	1,365,746
Chungbuk	487,678
Chungnam	402,680
Jeonbuk	440,071
Jeonnam	685,892
Gyeongbuk	1,286,222
Gyeongnam	698,316
Jeju	86,960
Total	6,287,325

Table 2. Economic comparison of biomass gasification and biocrude-oil gasification^[3]

	Biomass gasification	Bio-oil gasification
Gasification conditions		
- Temperature	870°C	1200°C
- Pressure	28 bar	20 bar
- Mass ratio of oxygen to feedstock	0.26	0.42
- Mass ratio of steam to feedstock	0.17	0.2
Gas composition (mole basis)		
- Water (H ₂ O)	19.4%	21.5%
- Carbon monoxide (CO)	24.1%	36.2%
- Hydrogen (H ₂)	20.0%	32.7%
- Carbon dioxide (CO ₂)	27.2%	9.6%
- Methane (CH ₄)	5.5%	< 0.1%
- Other	3.8%	< 0.1%
Total capital investment (2000 t/day)	560 \$million	510 \$million

해 반응기 내부에서의 바이오원유 액적 분사 특성 파악 및 바이오원유 가스화 반응계산을 수행하였다.

2. 미이용 산림바이오매스 수집 및 분석

미이용 산림바이오매스의 확보를 위하여 국내 국유림 관리소와 협조하여 바이오원유 생산에 적합한 미이용 산림바이오매스를 확보하고 물리-화학적 특성을 파악하기 위한 분석을 실시하였다. Fig. 1은 미이용 산림바이오매스 채취 현장 및 시료 사진이며, 채취한 미이용 산림바이오매스는 크게 활엽수와 소나무로 주로 구성된 침엽수로 구성되었다. 수집된 산림바이오매스는 산지에서 젖은 상태로 방치되어 있었기 때문에 먼저 야외에서 자연 건조를 진행한 후, 105°C의 오븐에서 24 시간 동안 건조하였다. 이후, 공업분석(TGA 701, Leco 社), 원소분석(Flash EA 1112 series, Thermo scientific 社), 발열량분석(AC 600, Leco 社), 열중량분석(TGA 701, Leco 社) 등을 수행하고 미이용 바이오매스



Fig. 1. Waste forest biomass in South Korea

Table 3. Analysis results of waste forest biomass

	Hardwood	Softwood
Proximate analysis (wt. %)		
- Moisture	1.24	1.24
- Volatile	87.88	86.37
- Fixed carbon	9.81	11.45
- Ash	1.08	0.95
Ultimate analysis (wt. %)		
- Carbon	44.46	43.77
- Hydrogen	6.41	6.04
- Oxygen	48.35	49.35
- Nitrogen	0.78	0.83
- Sulfur	-	-
Calorific value (kcal/kg)	5,000	4,860

오매스 별 물리-화학적 특성에 대한 데이터베이스를 구축하였으며 그 결과는 아래 Table 3과 같다.

공업분석 결과 미이용 산림바이오매스 시료는 80 wt.% 이상의 휘발분을 함유하고 있고 발열량도 약 5,000 kcal/kg 수준으로 높았으며 회분의 함량은 1 wt.% 이하로 상당히 낮아 바이오원유 생산에 적합한 것으로 판단되었다. 특히 원소분석 결과 황의 함량이 정량한계 미만으로 측정되어 추후 연료로서의 활용 시 황으로 인한 문제는 없을 것으로 예상되었다.

Fig. 2는 미이용 산림바이오매스에 대한 TGA 및 DTG 분석 결과를 나타낸다. 미이용 바이오매스의 종류에 따라 총 무게감량은 20-40 wt.% 정도이며 활엽수가 침엽수에 비해 많은 무게감량이 발생하였다. TGA 분석결과 100°C까지는 서서히 무게감량이 이루어지다가 약 250-350°C 구간에서 50 wt.% 정도의 무게가 급격히 감소되고 이후 900°C 까지 서서히 감소하는 경향을 확인하였다. 일반적으로 바이오매스는 크게 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌으로 이루어진 복합체이며 각각의 분해온도가 다르다. 먼저 헤미셀룰로오스는 100-365°C 구간에서 주로 분해되고 셀룰로오스는 270-400°C 구간에서 주로 분해가 일어난다. 또한 리그닌의 경우에는 100-800°C의 광범위한 구간에 걸쳐 서서히 분해가 이루어지는 것으로 나타나있다. 미이용 산림바이오매스의 DTG 그래프의 경우 100°C 부근의 피크는 수분의 증발이 주로 일어났음을 확인할 수 있고 이후 두 번째 피크가 시작되는 250-350°C 지점에서는 헤미셀룰로오스와 셀룰로오스가 분해되며 큰 폭의 무게감량이 이루어짐을 알 수 있고 이후에는 주로 리그닌의 분해가 이루어졌음을 확인할 수 있다.

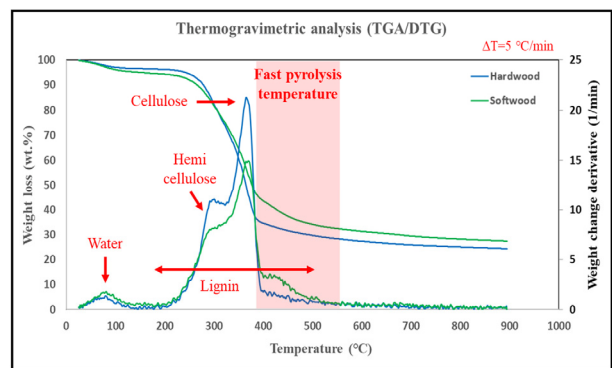


Fig. 2. Thermogravimetric analysis of waste forest biomass

3. 계산 방법

노즐로부터 분사되는 바이오원유는 액체 유량의 변화에 따라 다양한 형태를 보이며 노즐 외부의 형상은 노즐 출구에서의 축방향과 접선 방향의 속도 그리고 액체의 표면 장력 등 액체의 물성치에 의해 결정될 수 있다. 본 연구에서는 선행연구 결과^[5]를 기반으로 바이오원유의 분사를 위해서 이류체 노즐을 고려하였으며, 공급되는 기체에 의해 생기는 흡인력으로 액체가 흡입되어 노즐 선단의 Orifice를 통하여 분사되는 형식이다. 바이오원유의 가스화 반응이 충분히 일어나기 위해서는 오일 입자가 충분히 미립화 되어 공기와의 혼합이 최적으로 이루어져야하기 때문에 오일을 반응기 내로 분사하는 노즐의 특성 파악은 매우 중요하다.

3.1 절 지배방정식

본 연구에서 바이오원유 가스화 반응을 포함한 기체-액체 다상유동장 전산해석을 위한 전산모델링을 수행하였다. 다상유동 화학반응에 대한 전산모델을 수립하기 위하여 Eulerian-Lagrangian 접근법을 이용하였다. 유체 유동장은 Eulerian 방법으로, 바이오원유 액적들의 궤적은 Lagrangian 방법을 이용하여 해석하였다. 또한 다성분으로 구성된 바이오원유의 액적에 대한 증발 모델과 가스화 화학반응에 대한 전산모델을 수립하였다.

1) 기체상

계산영역 내 유체 유동장 지배방정식은 아래와 같이 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식 및 종수송 방정식으로 구성되며, 난류 유동장의 해석을 위하여 Realizable k-ε 난류 모델을 사용하였다.

- Continuity equation

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

- Momentum equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) \tag{2}$$

- Energy equation

$$\frac{\partial(\rho U_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{k_f}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j' T'} \right),$$

$$-\overline{\rho u_j' T'} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j}, Pr_t = 0.9 \tag{3}$$

- Species equation

$$\frac{\partial(U_j Y_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(D_{i,m} + \frac{\nu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \right], Sc_t = 0.7 \tag{4}$$

- Turbulent kinetic energy, k, equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \tag{5}$$

- Turbulent dissipation rate, ε, equation

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \sqrt{2S_{ij}S_{ji}} \varepsilon - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

2) 액체상

바이오원유 액적들의 궤적을 해석하기 위한 Lagrangian 방법에서 입자에 대한 운동량 보존 방정식은 아래와 같다. 또한 바이오원유 액적의 미립화를 모사하기 위한 일차, 이차 분산모델은 선행연구 전산모델^[5]을 활용하였다.

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_s + \vec{F}_b \tag{7}$$

식 (7)에서 \vec{F}_s 와 \vec{F}_b 는 액적에 작용하는 Surface force와 Body force를 의미하며, 식 (8), (9)와 같이 정의된다. 식 (9)에서는 입자에 가해지는 중력만을 고려하였다.

$$\vec{F}_s = \frac{1}{2} C_D \rho A_p (\vec{u} - \vec{v}_p) |\vec{u} - \vec{v}_p| \tag{8}$$

$$\vec{F}_b = m_p \vec{g} \tag{9}$$

가스화 반응기 내로 분사되는 바이오원유는 미립화 및 증발되어 최종적으로 산화제와 반응하여 합성가스가 생성

된다. 바이오원유 가스화 화학반응을 위해 고려된 가스화 반응식은 아래 Table 4와 같으며 아래니우스식의 전지수 인자 및 활성화에너지 값은 참고문헌 값을 적용하였다.

Table 4. Biocrude-oil gasification reaction^[6~10]

Reaction	
Tar cracking ^[6,7]	$CH_{1.99}O_{0.89} \rightarrow 0.66CO + 0.23H_2O + 0.765H_2 + 0.34C$
Boudouard reaction ^[8]	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$
Water-gas reaction ^[8]	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$
Hydro gasification ^[8]	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$
Carbon partial reaction ^[8]	$2C + O_2 \rightarrow 2CO$
Oxidation reaction #1 ^[9]	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO_2$
Oxidation reaction #2 ^[8]	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$
Oxidation reaction #3 ^[9]	$CH_4 + 1.5O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$
Water-gas shift reaction ^[10]	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$
Steam-reforming reaction ^[8]	$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$

3.2 절 계산방법 및 조건

본 연구에서 지배방정식인 RANS 방정식의 해를 구하기 위해 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 기반으로 하는 상용코드인 STAR-CCM+을 사용하였다. 또한 시간 이산화는 2차 음해법(Second Order Implicit Method), 확산화 이산화는 2차 중심 차분(Central differencing), 대류항의 이산화는 유한체적들 간의 접합면에서 미지량에 대해 2차 Upwind 방법에 의해 이산화하였다. 또한, 연속 방정식을 만족시키는 올바른 압력장을 구하기 위해 연속 방정식으로부터 간접적으로 압력장을 계산하는 방법으로 유한 체적법에 흔히 쓰이는 속도 압력 연성 방법인 SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation) 방법을 사용하였다.

본 CFD 시뮬레이션에 적용된 바이오원유 분사용 노즐은 한미노즐(주)에서 상용 판매중인 노즐을 적용하였으며 상세 규격 및 모습은 아래 Table 5 및 Fig. 3과 같다. 해당 노즐을 통해 바이오원유는 원통형 반응기(D = 0.1 m, H = 1.4 m)

Table 5. Specifications of biocrude-oil injection nozzle

	Cross section area of liquid orifice	Cross section area of air orifice
XA-SR250	0,386 mm ²	1,217 mm ²



Fig. 3. Biocrude-oil injection nozzle

내부로 분사되어 가스화 반응이 일어나는 것을 고려하였다.

최종적으로 본 시뮬레이션에서 적용된 3D 모델링 및 계산 격자는 아래 Fig. 4와 같으며 비정렬격자를 이용하여 3차원의 계산 격자를 구성하였고, 격자 수는 약 18만 개로 구성하였다. 특히, 바이오원유가 분사되는 노즐 주위는 유동 변화 및 가스화 반응이 활발하게 일어나기 때문에 격자를 조밀하게 생성하였다. 바이오원유 및 산화제가 투입되는 면적은 이류체 노즐을 모사하기 위하여 이류체 노즐의 규격을 적용하였다.

계산영역에 대한 경계조건은 Table 6에 나타낸 바와 같

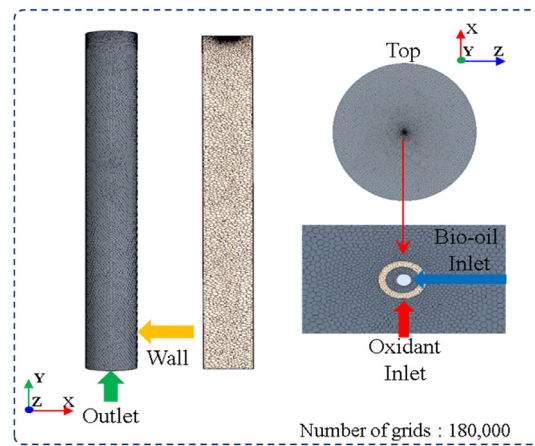


Fig. 4. Computational grid for biocrude-oil gasification reactor

Table 6. Boundary conditions for biocrude-oil gasification simulation

	Conditions
Oxidant Inlet	- Constant gas flow rate (9-13 L/min) - Constant temperature
Biocrude-oil Inlet	- Constant biocrude-oil feeding rate (1 kg/hr) - Constant biocrude-oil temperature
Outlet	- Constant pressure - 0 Pa (Atmospheric)
Wall	- No-slip condition - Adiabatic

이 산화제와 바이오원유의 투입 부분은 일정온도 및 유량 조건을 설정하였다. 먼저 바이오원유의 투입유량은 1 kg/hr 로 고정하였으며 산화제의 투입 적정유량을 도출하기 위하여 먼저 산화제 유량 조건을 9-13 L/min으로 설정하였다. 분사 특성 계산을 통해, 적정 산화제 투입 유량을 선정하였으며 해당 유량에서의 가스화 반응 해석을 수행하였다. 가스화 반응온도는 1,273 K으로 고정하였다. 출구는 대기압 조건으로, 반응기 벽면은 no-slip, 단열조건으로 경계조건을 설정하였다.

먼저 Fig. 5와 같이 구성된 이동식 열분해 장치를 활용하여 열분해 반응온도 450°C에서 미이용 산림바이오매스로부터 바이오원유를 생산하였다. 생산된 바이오원유의 물리·화학적 특성은 Table 7에 정리되어 있으며, 본 연구에서는 이를 적용하여 바이오원유 분사 및 가스화 반응 해석을 수행하였다. 특히, 바이오원유의 원소분석 결과를 바탕으로 분자식을 도출하였으며, 이를 활용하여 가스화 반응의 ER(Equivalence Ratio) 조건별 산화제 공급량을 계산하였다.



Fig. 5. Waste forest biomass transportable pyrolysis system

Table 7. Analysis results of biocrude-oil

Properties			
Biocrude-oil Ultimate analysis (dry base, wt%)	- C : 42.6%, H : 7.0%, O : 50.4% - Molecular formula : CH _{1.99} O _{0.89}		
Total components	- N ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ O, C(S), CO, CO ₂ , CH ₄ , Tar		
Biocrude-oil LHV (MJ/kg)	14.5	Biocrude-oil Density (kg/m ³)	1,200
Biocrude-oil Viscosity (cP)	70	Biocrude-oil Particle size (mm)	0.7

4. 계산 결과 및 고찰

먼저 바이오원유의 분사 특성에 대한 계산 결과는 아래 Fig. 6과 같다. 산화제 투입유량이 증가할수록 이류체 노즐을 통해 바이오원유 액적이 분사되는 각도도 증가하는 모습을 확인할 수 있다.

Fig. 7과 8은 반응기 내 존재하는 분사된 바이오원유 액적의 개수를 나타낸 것으로 액적의 직경 별 및 중앙부터 반응기 벽면까지의 거리 별로 분류하여 표현하였다. 산화제 유량이 증가함에 따라 액적과 산화제의 충돌 횟수 증가로 인하여 바이오원유 액적의 직경은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 산화제 유량 12 L/min 이상에서는 11 L/min 이하 조건에 비해 특히 반응기 벽면에 도달한 액적 수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 분사각이 증가하여 액적이 넓게 분산되고, 액적의 직경이 감소할수록 가스화를 위한 표면적을 넓게 확보하여 열전달효율을 높일 수 있다. 다만 액적이 벽면에 충돌할 경우 충돌한 액적끼리 다시 합쳐져 큰 물방울을 형성하여 오히려 가스화 반응을 저해할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 바이오원유의 분사 특성 결과를 분석하여 산화제의 적정유량은 11 L/min으로 판단할 수 있었다.

바이오원유 분사특성 결과를 통하여 위와 같이 산화제 적정유량을 11 L/min으로 도출하였으며 다음으로는 해당 산화제 적정유량에서 가스화 반응의 ER 변화에 따른 가스화

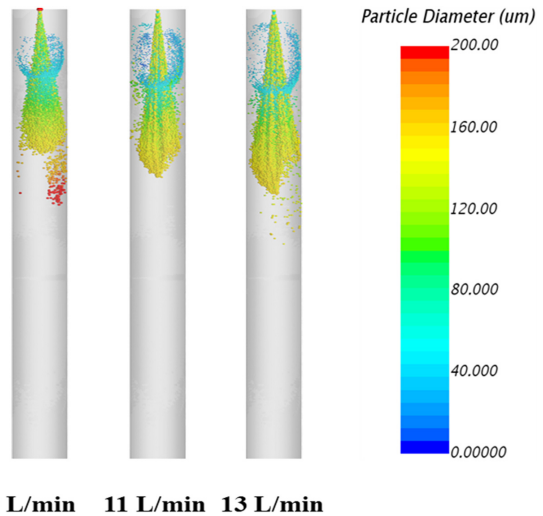


Fig. 6. Biocrude-oil spray characteristic

반응 해석을 수행하였다. 가스화 반응 ER 조건은 0.2-0.4로 수행하였으며 산화제 적정유량 11 L/min에서 해당 ER을 만족하기 위한 산소 유량을 제외하고 나머지 유량은 질소를 투입하였다.

가스화 반응 결과로는 아래 Fig. 9와 같다. 가스화 결과 생성된 Major 가스로 H₂, CO, CO₂, CH₄의 비율을 정리하였으며, 산화제 적정 유량을 만족하기 위해 같이 투입된 질소를 제외한 후 Major 가스의 조성을 100% 환산하여 나타

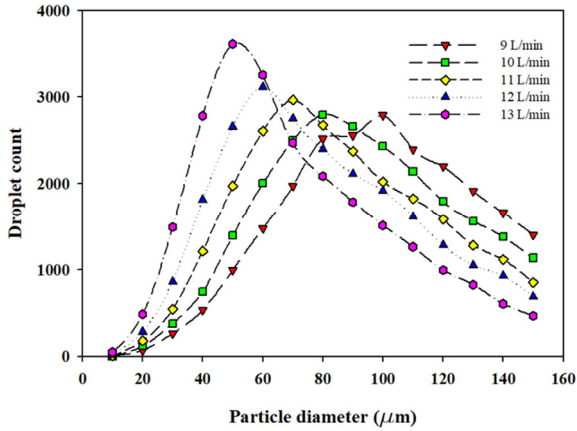


Fig. 7. Droplet size distribution of biocrude-oil in reactor

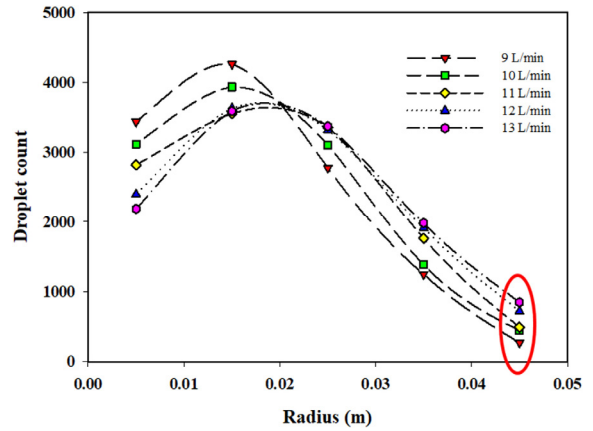
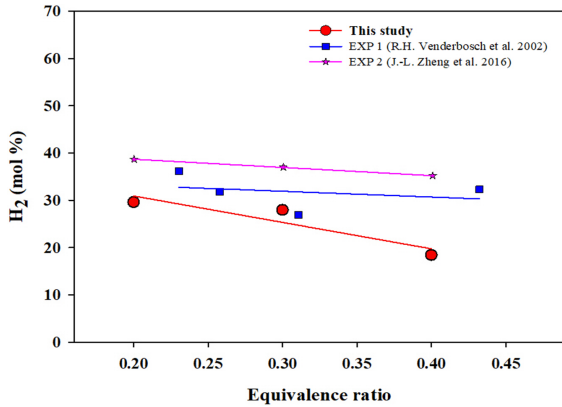
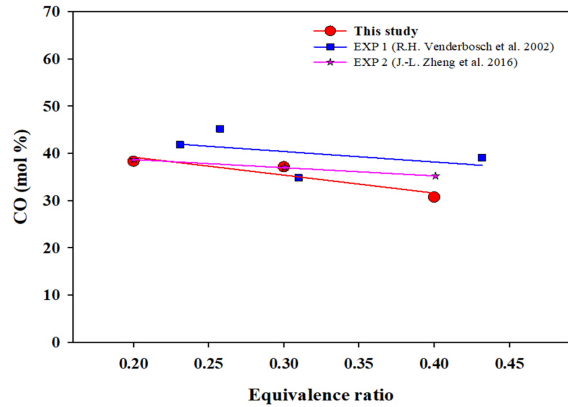


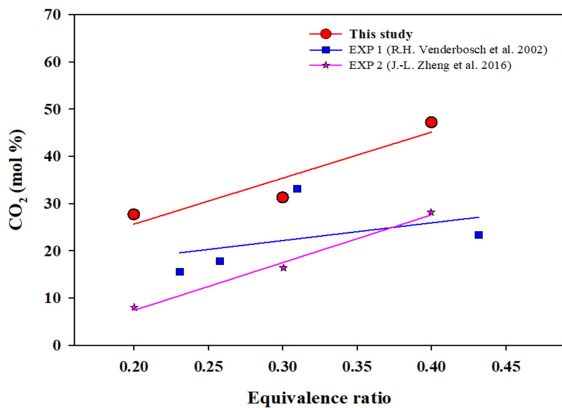
Fig. 8. Radial distribution of biocrude-oil droplets



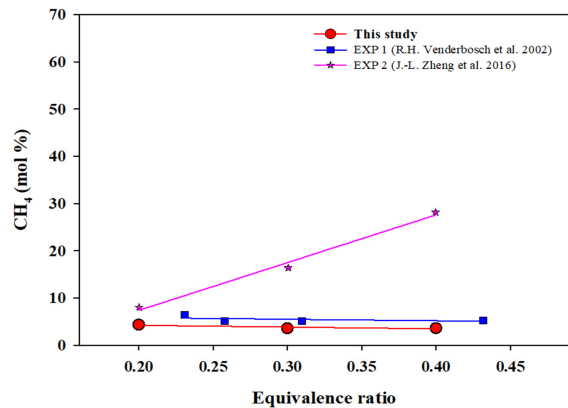
(a) H₂



(b) CO



(c) CO₂



(d) CH₄

Fig. 9. Syngas composition from biocrude-oil gasification

내었다. ER이 0.2에서 0.4로 증가할수록 높아질수록 투입되는 산소농도가 높아져 발열반응이 많아짐으로 CO₂의 비율은 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 나머지 Major가스의 비율은 감소하였다. 본 CFD 시뮬레이션 해석 결과는 바이오원유 가스화 실험 논문의 결과값^[11,12]과 비교하였으며, 대체로 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인하였고 본 연구의 목적인 가스화 반응기의 최적 설계를 위한 바이오원유 가스화 반응 전산 모델은 잘 확립되었음을 판단할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 미이용 산림바이오매스의 활용 가능성을 검토하기 위해 바이오원유 생산 및 이를 활용한 합성가스 생산 공정을 분석하였다. 미이용 산림바이오매스의 물리·화학적 특성을 기반으로 1 kg/hr급 바이오원유 가스화 반응기의 최적 설계를 위한 CFD 시뮬레이션을 수행하였다.

연구 결과, 국내 미이용 산림바이오매스는 높은 휘발분과 적절한 발열량을 갖추고 있어 바이오원유 생산에 적합한 원료임을 확인하였다. CFD 해석을 통해 바이오원유 가스화 반응기의 최적 조건을 분석한 결과, 산화제 유량 11 L/min에서 가장 효율적인 분사가 이루어졌으며, 반응온도 1,273 K 및 ER 조건 0.2-0.4 범위에서 수행한 가스화 반응 전산해석 결과, 합성가스 조성이 타 연구자의 선행 연구와 유사한 경향을 보였다. 이를 통해 본 연구에서 개발한 가스화 반응 전산 모델이 타당하게 확립되었음을 확인하였다.

향후 연구에서는 본 전산 모델을 실증 실험과 연계하여 정확도를 추가 검증할 예정이며, 이를 기반으로 국내 미이용 산림바이오매스를 활용한 지속가능한 에너지원 개발 및 탄소중립 실현에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2021356A00-2323-AC03)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Korea Forest Service, 2024, "The statistical yearbook of forestry 2024(54th)", Accessed 28 February 2025, <https://kfss.forest.go.kr/stat/ptl/fyb/frstyYrBookList.do?curMenu=9854>.
- [2] Choi, Y.S., Choi, S.K., Kim, S.J., Han, H.C., and Jeong, Y.W., 2017, "Effect of biomass particle size on the fast pyrolysis characteristics of palm kernel shell to produce biocrude-oil", *New. Renew. Energy*, **13**(4), 55-63.
- [3] Li, Q., Zhang, Y., and Hu, G., 2015, "Techno-economic analysis of advanced biofuel production based on bio-oil gasification", *Bioresour. Technol.*, **191**, 88-96.
- [4] Hasler, P. H., and Nussbaumer, T., 1999, "Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification", *Biomass and Bioenergy*, **16**(6), 385-395.
- [5] Choi, M.K., Kang, S.J., Kim, H.S., Park, H.C., and Choi, H.S., 2019, "Numerical study on injection characteristics of bio-oil using twin fluid nozzle for bio-oil gasification reactor", *J. of Korea Soc. Waste Manag.*, **36**(3), 267-277.
- [6] Janajreh, I., and Shrah, M.A., 2013, "Numerical and experimental investigation of downdraft gasification of wood chips", *Energy Conv. Manag.*, **65**, 783-792.
- [7] Gómez-Barea, A., and Leckner, B., 2010, "Modeling of biomass gasification in fluidized bed", *Prog. Energy Combust. Sci.*, **36**(4), 444-509.
- [8] Xie, J., Zhong W., Jin, B., Shao, Y., and Liu, H., 2012, "Simulation on gasification of forestry residues in fluidized beds by Eulerian-Lagrangian approach", *Bioresour. Technol.*, **121**, 36-46.
- [9] Salem, A.M., Kumar, U., Izaharuddin, A.N., Dhimi, H., Sutardi, T., and Paul, M.C., 2018, "Advanced numerical methods for the assessment of integrated gasification and CHP generation technologies", *Coal and Biomass Gasification: Recent Advances and Future Challenges*, 307-330.
- [10] Nakod, P., 2013, "CFD modeling and validation of oxy-fired and air-fired entrained flow gasifiers", *Int J Chem Phys Sci.*, **2**(6), 28-40.
- [11] Venderbosch, R.H., Van de Beld, B., and Prins, W., 2002, "Entrained flow gasification of bio-oil for synthesis gas", 12th European Conference and technology Exhibition on biomass for energy, Industry and Climate Protection.
- [12] Zheng, J.L., Zhu, M.Q., Wen, J.L., and Sun, R.C., 2016, "Gasification of bio-oil: Effects of equivalence ratio and gasifying agents on product distribution and gasification efficiency", *Bioresour. Technol.*, **211**, 164-172.