

한국 왕겨 바이오매스의 가스화를 통한 수소 생산 공정모사 예비 연구

손지현 · 유미래 · 김명지 · 이상훈[†]

이화여자대학교 엘텍공과대학 기후·에너지시스템공학전공

A Preliminary Study on Simulating the Hydrogen Production Process through Biomass Gasification Using Rice Husks from Korea

JIHYUN SON, MIRAE YU, MYUNGJI KIM, SANGHUN LEE[†]

Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University, 52 Ewhayeodae-gil, Seodaemun-gu, Seoul 03760, Korea

[†]Corresponding author :
sanghun@ewha.ac.kr

Received 3 September, 2022

Revised 20 October, 2022

Accepted 21 October, 2022

Abstract >> Recently, hydrogen production is attracting attention. In this study, a process simulation was conducted on the gasification reaction to produce hydrogen using rice husks, which are produced as by-products of rice. For this purpose, Chuchung, Odae, and Dongjin rice, which are rice varieties produced in Korea, were compared with the literature. The Korean rice contained more hydrogen and less oxygen compared to the literature. As a result of the simulation, large amounts of H₂ and CH₄ and small amounts of CO₂ and CO were produced accordingly. The conditions to maximize hydrogen production were a gasification reaction temperature of 700°C and an Steam-to-Biomass (S/B) ratio of 0.4-0.6. However, because the S/B ratio is related to the gasification catalyst degradation, the model needs to be improved through additional experiments in the future. This study showed the possibility of hydrogen production using Korean rice husks, which had not been reported.

Key words : Hydrogen(수소), Biomass(바이오매스), Rice husk(왕겨), Process simulation(공정모사), Gasification(가스화)

1. 서론

최근 기후위기에 대한 대응으로 탄소중립 사회로 이행하기 위한 방안이 중요시되고 있다¹⁾. 또한 러시아-우크라이나 전쟁으로 많은 국가들이 자원 확보 및 전 세계 에너지 자립의 중요성이 다시 대두되고 있다. 우리나라는 현재 에너지 수입 의존도가 95%

수준으로 매우 높은 편으로 에너지 자급에 대한 문제가 현재까지 해결되지 않고 있다²⁾. 따라서 앞으로 국가 경쟁력을 발전시키기 위해서는 에너지 자립을 높일 필요가 있다. 안정적인 에너지 확보와 탄소중립 달성이라는 두 가지 목표 아래에서 우리나라는 신재생에너지 사용을 늘리기 위해 노력하고 있다. 그 중 특히 수소에너지가 각광을 받고 있다. 수소는 지

구상에 가장 풍부한 물질인 물로부터 만들어지기에 고갈될 위험이 없으며 연소 생성물이 물밖에 없어 탄소 배출을 하지 않는 청정연료로 여겨진다^{3,4)}. 또한 수소에너지 기술은 계절과 날씨에 영향을 많이 받는 풍력 및 태양광의 단점을 보완할 수 있는 차세대 에너지 기술 중 하나이다^{5,6)}.

다양한 수소 생산 방식과 함께 수소를 제조하는데 쓰이는 연료 또한 여러 가지가 있다. 천연가스, 원유, 석탄, 물, 폐기물, 바이오매스 등이 바로 수소 생산 연료가 될 수 있다⁷⁻¹⁰⁾. 이 중 바이오매스란 생물을 의미하는 bio와 양을 나타내는 mass의 합성어로 동식물로부터 얻을 수 있는 에너지자원을 뜻한다¹¹⁾. 바이오매스를 이용하여 에너지를 생산할 때 비록 이산화탄소가 배출되더라도, 발생된 이산화탄소가 다시 광합성을 통해 소비되어 유기물로 합성되어 결과적으로 탄소를 배출하지 않는 특징이 있다. 따라서 자원 고갈의 위험과 온실가스 배출의 문제가 있는 화석연료와 달리 부존량이 많으며 실질적 이산화탄소의 배출량이 0인 바이오매스의 중요성이 더욱 커지고 있다. 바이오매스는 목질, 옥수수, 대나무, 쌀 등으로 종류가 매우 다양하며 벼짚, 왕겨, 보릿대 등과 같이 농업 생산에서 기본 생산물 이외에 부차적으로 얻을 수 있는 농업 부산물 또한 바이오매스 종류에 포함될 수 있다¹²⁾. 이와 같은 농업 부산물은 주로 연소, 폐열발전, 가스화 등에 활용될 수 있다^{13,14)}.

왕겨는 벼를 수확한 후 건조·저장·가공하는 과정에서 도정 과정에서 발생하는 농업 부산물이다. 왕겨의 양은 쌀의 품종 등에 따라 차이가 존재하기는 하지만 평균적으로 쌀의 무게의 약 20% 정도이다¹⁵⁾. 왕겨의 성분 구성은 기후조건, 지형, 품종 등에 따라 조금씩 다르지만 평균적으로 탄소, 수소, 산소, 질소, 황, 수분, 회분의 성분을 가지고 있다. 현재 국내의 왕겨 생산량은 매년 약 100만 톤 이상으로, 많은 양이 발생하고 있다¹⁶⁾. 왕겨는 3,000 kcal/kg으로 높은 발열량을 가지고 있으며 황과 중금속의 함량이 거의 없기 때문에 청정 에너지 연료로서 활용이 가능하다¹⁷⁾. 그럼에도 불구하고, 과거의 왕겨는 규소 성분의 부패가 잘 일어나지 않아 퇴비화가 어렵고 약취 및 토양

오염을 일으킬 수 있기 때문에 단순히 농업의 폐기물로 분류되었고, 폐기물관리 법상 복잡한 거래 및 처리 과정을 가졌다. 하지만 2021년 환경부에서 왕겨의 자원 가치를 인정하여 왕겨를 폐기물관리법 적용 대상에서 제외하여 에너지로서 활용 가능성이 열리게 되었다. 따라서 왕겨를 자원으로 활용할 수 있는 방법에 대한 다양한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 한국 왕겨를 활용한 가스화 반응을 통해 한국 왕겨를 활용한 수소 생산 가능성을 평가하는 연구를 수행하였다. 가스화란 화석연료나 일반적인 유기물에 열을 가해 기체로 분해하는 화학공정을 말하는데, 가스화 반응의 최종 생성물로부터 수소를 얻을 수 있다¹⁸⁾. 가스화 반응은 입자의 크기, 반응 온도, 촉매유무, 당량비 등 여러 변수들에 의해 영향을 받기 때문에 각 변수의 조건에 따라 수소를 포함하고 있는 합성가스(syngas)의 품질이 달라질 수 있다. 본 연구에서는 특히 가스화 공정 중 가장 핵심적인 가스화 반응기의 온도, 연료와 스팀의 비율을 주요 변수로 선정하였으며, 동일한 조건에서 주요 변수만 바꾸어 공정모사를 수행하였다. 각 공정모사 결과를 통해 가스화 반응의 주 생성물인 H₂, CH₄, CO, CO₂의 생산량을 분석하여 각 변수들이 공정에 미치는 영향을 파악하고 수소 생산을 위한 최적의 조건을 도출하였다.

2. 공정모사 모델링

2.1 바이오매스 가스화 공정모사

바이오매스 가스화 공정모사를 위하여 Aspen Plus 소프트웨어를 사용하였다. 바이오매스 가스화의 공정모사를 위해서는 Aspen Plus에서 기본적으로 제공되는 반응기인 RStoic, RYield, RGibbs를 이용하여 건조기, 열분해기, 가스화 반응기를 모사하였다. 본 연구에서 구성한 공정모사는 Fig. 1과 같다.

먼저, Aspen Plus에서 왕겨와 같은 바이오매스의 화학평형을 계산하기 위해서는 ultimate analysis를 통해 C, H₂, N₂, S, O₂, 수분의 조성을 입력하고, ap-

proximate analysis를 통해 가열 과정에서 발생하는 moisture, volatile matter, fixed carbon과 같은 물질을 모사할 필요가 있다. Ultimate, proximate analysis의 수행을 위해 왕겨의 조성을 기존의 문헌을 참고하여 각각 결정하였다^{19,20}. 본 공정으로 공급되는 왕겨는 100 g/sec로 가정하였다. 왕겨의 열분해를 위해서 가열하는 과정에서 수분의 건조가 동반된다. 따라서 본 연구에서는 DRYER를 RStoic 반응기로 모사하였으며 온도를 105°C로 설정하여 왕겨 내부의 수분이 증발할 수 있도록 하였다. 건조된 수분은 분리기를 통해 분리되도록 하였으며, 건조된 바이오매스는 열분해를 위한 DECOMP 반응기로 공급되었다. DECOMP 반응기는 RYield 반응기를 이용해 모사하였다. RYield 반응기에 사용되는 yield 값은 Table 1의 왕겨의 화학적 조성을 기반으로 결정하였다^{19,20}. 열분해 온도는 바이오매스 열분해가 발생하는 것으로 일반적으로 알려진 500°C로 설정하였다. 이러한 과정을 통해 바이오매스의 열분해로부터 발생하는 가스를 모사하

였다. 마지막으로 해당 가스의 가스화를 도와줄 스팀과 함께 GASIF 반응기로 공급하여 가스화 반응을 진행하였다. 가스화 반응기는 열역학적 평형을 찾기 위해 RGibbs 반응기를 이용해 모사하였다. 가스화 반응의 기준 온도는 700°C, 공급되는 바이오매스의 질량유량에 대한 스팀의 질량유량을 의미하는 steam-to-biomass 질량 비율(S/B 비율)은 0.8로 설정하였다.

2.2 공정조건 및 공정 변수의 영향 분석

수소 생산을 위한 가스화 반응은 다양한 공정 변수들의 영향을 받아 합성가스의 조성, 수소 수율, 반응 특성 등이 달라질 수 있다. 특히, 여러 공정 변수들 중 가스화 반응의 온도와 S/B 비율은 합성가스의 조성에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 따라서 본 연구에서는 가스화 온도와 S/B 비율을 주요 변수로 설정하여 공정 결과에 미치는 영향을 확인하였으며, 이를 통해 수소 생산을 위한 최적의 반응 조건을 도

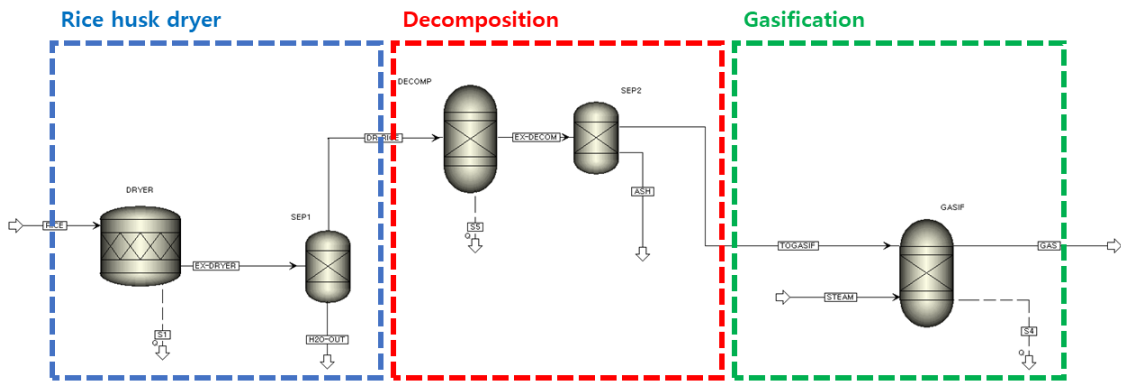


Fig. 1. Rice husk gasification model established by Aspen Plus software

Table 1. Chemical composition of rice husk

	Ash (wt.%)	Moisture (wt.%)	Carbon (wt.%)	Hydrogen (wt.%)	Nitrogen (wt.%)	Sulfur (wt.%)	Oxygen (wt.%)	Source
Reference (India)	19.52	9.95	38.43	2.97	0.49	0.07	36.36	¹⁹⁾
Chuchung (Ansan)	15.65	9.84	38.268	5.736	0.285	0.012	30.202	²⁰⁾
Odae (Namwon)	13.34	10.02	36.612	5.427	0.343	0.029	34.229	²⁰⁾
Dongjin (Buan)	13.15	12.08	39.092	5.439	0.497	0.050	29.692	²⁰⁾

출하고자 하였다. 이를 위해 Table 2와 같이 케이스 1은 가스화기의 온도를 변수로 설정하였으며 케이스 2는 S/B 비율을 변수로 설정하여 가스화 반응의 특성을 확인하였다. S/B 비율의 경우 지나치게 증가하는 경우, 과량의 증기로 인하여 경제성이 떨어지는 이슈가 있을 수 있기 때문에 최대 1.0까지 그 경향성을 분석하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 한국 왕겨의 특성

기존 문헌에서 보고된 왕겨와 국내 다양한 품종벼의 조성 성분 및 가열에 따른 생성물을 분석한 결과 Table 2와 같다. 국내 왕겨의 조성 성분은 품종과 지역별로 조금의 차이가 존재하는데, 이는 지역별 기후와 재배 조건 등이 다르기 때문이다. 동진(부안), 오대(남원), 추청(안산) 3가지 품종의 왕겨를 선택하여 기존 문헌 상에 보고된 인도의 왕겨와 비교한 결과 국내의 왕겨의 조성 성분은 해외의 왕겨에 비해 황과 질소 성분이 적게 포함되어 있다. 이를 통해 화학 반응 시 질소산화물이나 황산화물 발생량이 적을 가능성이 높으며, 이에 따라 보다 친환경적인 이용이 가능할 수 있다. 또한 국내 3가지 품종의 경우 수소의 함량이 높고 해외 왕겨의 경우 회분과 황의 함량이 우리나라의 것에 비해서 높은 것을 확인할 수 있다.

3.2 가스화 반응기 온도의 영향

Fig. 2는 다양한 왕겨의 가스화 온도에 따른 생성 가스 조성을 나타낸다. Y축에 해당하는 가스의 조성은 왕겨 가스화 공정의 주요 생성물인 H₂, CH₄, CO, CO₂의 생산량의 총합에 대한 각 가스 생산량의 비로 정의하였으며, 이때 미반응 스팀은 농도 희석 효과를 배제하기 위해 가스 조성에 포함되지 않았다. 가스화 온도에 따른 생성가스의 조성을 보았을 때, 인도의 왕겨와 오대는 700°C에서, 추청과 동진은 800°C에서 H₂ 조성이 최고값을 가진다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 결과로 미루어 보아, 가스화 온도를 무조건 증가 혹은 감소시키는 것보다는 각 왕겨에 맞는 최적의 가스화 온도를 찾는 것이 필수적으로 판단되었다. 또한 모든 왕겨에 대해서 공통적으로 가스화 온도가 증가하는 경우에는 CO의 비율이 증가하고, 반대로 CH₄와 CO₂의 비율은 점진적으로 감소하는 경향성을 보인다. 이러한 결과는 기본적으로 4가지 바이오매스 모두 왕겨로서 세부 조성성분이 다르더라도 대체적인 구성은 유사하기 때문으로 파악된다.

기준으로 삼은 인도의 왕겨와 한국의 왕겨를 비교할 경우, 동일한 조건에서 한국의 왕겨에서 더 많은 H₂와 CH₄가 발생한다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 기본적인 왕겨의 조성 차이에서 기인한다. 한국의 왕겨는 많은 양의 수소를 포함하고 있으며, 반대로 적은 양의 산소를 포함하고 있다. 이로 인하여 한국의 왕겨에서 좀 더 많은 양의 H₂와 CH₄이 발생하고, 적은 양의 CO₂와 CO가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Parametric study for rice husk gasification process

	Parameter	Type	Value/range
Case study 1	Decomposition temperature	Constant	500°C
	Gasifier temperature	Variable	500, 600, 700, 800, 900°C
	Steam-to-biomass ratio	Constant	0.8
Case study 2	Decomposition temperature	Constant	500°C
	Gasifier temperature	Constant	700°C
	Steam-to-biomass ratio	Variable	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0

3.3 S/B 비율의 영향

Fig. 3은 다양한 왕겨의 S/B 비율에 따른 생성가스 조성을 나타내고, Fig. 2와 마찬가지로 미반응 스팀은 가스 조성에 포함되지 않는다. S/B 비율에 따른 생성가스의 조성을 확인하였을 때 모든 왕겨에 대해서 S/B 비율이 증가할수록 H₂와 CO₂의 조성 또한 증가함을 확인할 수 있다. 반면에 CH₄와 CO는 S/B 비율이 증가함에 따라 감소하는 경향성을 보인다.

본 연구에서 나타난 경향성은 Table 3의 가스화 반응기에서 일어나는 수소 생산 반응들을 통해 설명할 수 있다. Water-gas reaction (R1), water-gas shift

reaction (R2), steam reforming of methane (R3) 반응은 가역반응으로서 투입되는 스팀의 양이 증가할수록 스팀을 소모하기 위해 반응이 정반응 방향으로 많이 일어나게 된다. 이를 통해 S/B 비율에 따라 수소의 조성이 증가하는 경향을 설명할 수 있다.

하지만 S/B 비율은 바이오매스 가스화 반응 촉매의 내구성을 결정하는 중요한 요소 중 하나로 알려져 있다^{21,22}). 일반적으로 탄화수소 계열 연료로부터 수소를 생산하는 반응의 경우, 사용되는 촉매에 지속적인 탄소침적 및 열화가 발생할 수 있다²³). 이를 억제하기 위해서는 충분한 양의 스팀을 공급하여 탄소 침적을 억제하는 것이 중요하다. 따라서 향후 연구에

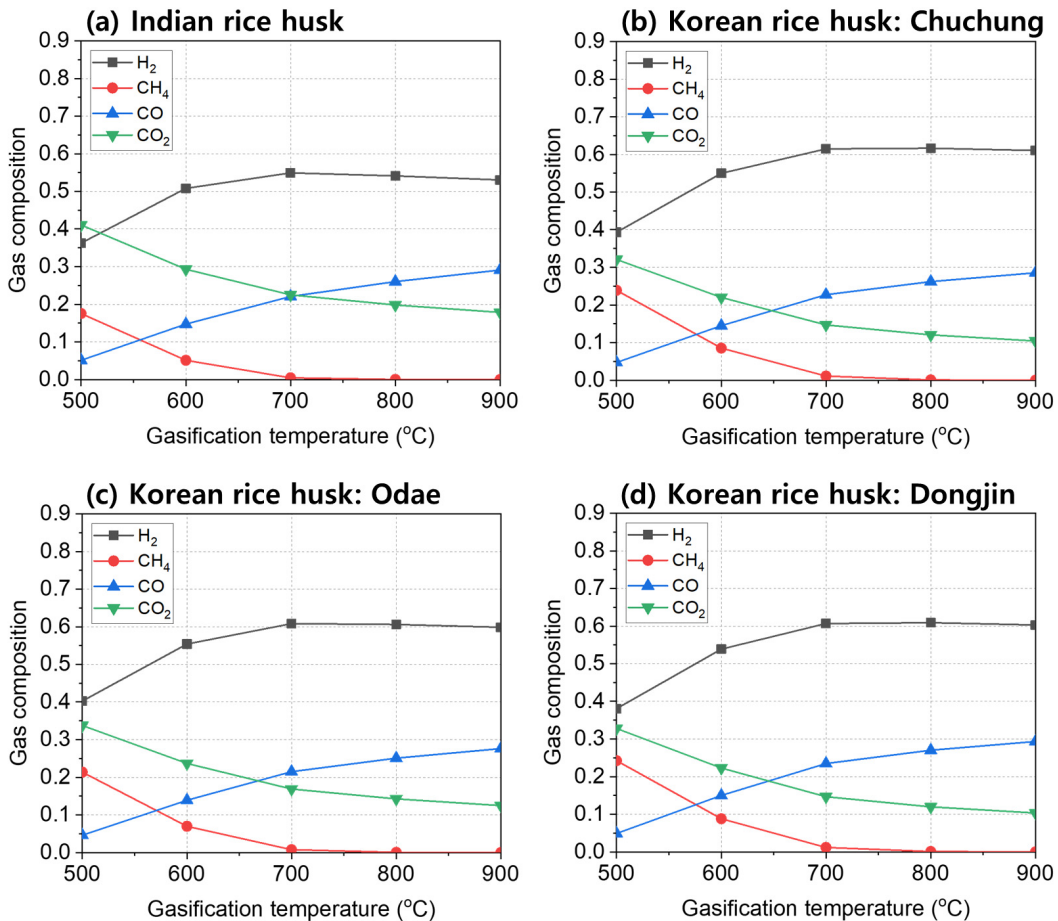


Fig. 2. Gas composition of the outlet gas from steam gasifier with different gasification temperatures. (a) Indian rice husk, and Korean rice husk of (b) Chuchung, (c) Odae, and (d) Dongjin.

서는 한국 왕겨에 대한 가스화 반응에 적합한 촉매를 선정하고, 실제 촉매반응 실험 결과를 반영하여 본 모델을 개선해야만 더 정확한 S/B 비율을 결정할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 대표적인 바이오매스인 왕겨를 활용하여 수소를 생산하는 가스화 반응에 대한 공정모사 연구를 수행하였다. 특히, 기존에는 연구된 바 없는 한국의 벼 품종인 추청, 오대, 동진벼에서 발생하

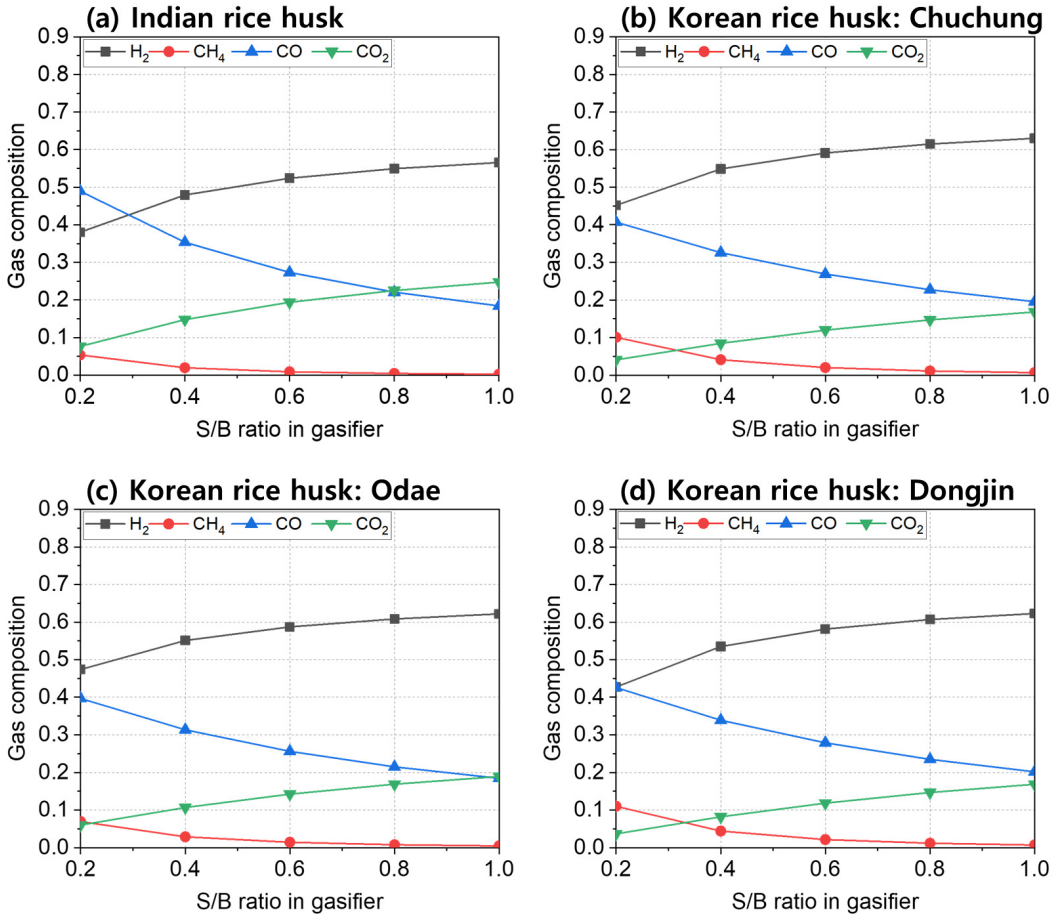


Fig. 3. Gas composition of the outlet gas from steam gasifier with different S/B ratios. (a) Indian rice husk, and Korean rice husk of (b) Chuchung, (c) Odae, and (d) Dongjin.

Table 3. Main chemical reactions producing H₂ in gasifier

Reaction number	Reaction name	Reaction
R1	Water-gas reaction	$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$
R2	Water-gas shift reaction	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
R3	Steam reforming of methane	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$

는 왕겨를 활용하고자 하였다. 이를 위해 기본적인 한국 왕겨의 특성을 파악하여 기존에 연구되었던 외국 왕겨에 비해 한국의 왕겨가 수소 함량이 높으며, 산소 함량이 낮은 특징을 가짐을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 스팀 가스화 반응 공정모사를 수행하였다. 그 결과 한국 왕겨를 가스화하는 경우, 생성가스에서 H_2 와 CH_4 의 비율이 높으며 CO_2 와 CO 의 비율이 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 기본적인 왕겨의 조성차이에서 기인한 것으로 판단된다. 또한, 가스화 반응기 온도를 $500-900^\circ C$ 로 변화시켜 가며 분석한 결과, 가스화 온도가 $700^\circ C$ 인 경우에 가장 많은 비율의 수소 생산량을 확인할 수 있었다. S/B 비율을 바꾸어 가며 분석한 결과, S/B 비율이 증가할수록 더욱 많은 비율의 수소 생산량을 얻을 수 있었다. 하지만 S/B 비율의 경우 열역학 기반의 공정모사로부터 정확히 추정할 수 없는 탄소침적에 의한 촉매의 열화에 영향을 줄 수 있다. 또한, 최종 생성가스의 조성에 황이 미량 포함되어 있는데, 황 또한 실제 반응에서 촉매의 열화를 일으킬 수 있는 요소이다. 따라서 향후 실험적으로 한국 왕겨에 대한 가스화 반응 촉매 반응 특성을 도출하고, 공정모사 단계에서 생성가스에서 황을 제거하기 위한 추가적인 공정 모델링이 필요하다. 이를 기반으로 좀 더 정확한 공정모사 모델의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 그동안 연구되지 않았던 한국의 왕겨를 활용하여 수소를 생산하는 가스화 반응 가능성을 보여주었다. 또한 공정모사 결과를 통해 추정하게 되면, 국내에서 매년 100만 톤 이상 생산되는 왕겨를 가스화할 경우 연간 최대 약 10만 톤의 수소를 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2022학년도 이화여자대학교 교내연구비 지원에 의한 연구입니다. 이 논문은 정부(기상청)의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되

었습니다.

References

1. H. Cheon, G. Han, and J. Bae, "Study on the pressurized steam reforming of natural gas and biogas mixed cokes oven gas", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 111-118, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.2.111>.
2. W. Choi and H. H. Song, "Well-to-wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles in countries dependent on the import of fuels through maritime transportation: a South Korean case study", *Appl. Energy*, Vol. 230, 2018, pp. 135-147, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.092>.
3. W. Lubitz and W. Tumas, "Hydrogen: an overview", *Chem. Rev.*, Vol. 107, No. 10, 2007, pp. 3900-3903, doi: <https://doi.org/10.1021/cr050200z>.
4. H. Lee and S. Lee, "Economic analysis on hydrogen pipeline infrastructure establishment scenarios: case study of South Korea", *Energies*, Vol. 15, No. 18, 2022, pp. 6824, doi: <https://doi.org/10.3390/en15186824>.
5. S. Lee, T. Kim, G. Han, S. Kang, Y. S. Yoo, S. Y. Jeon, and J. Bae, "Comparative energetic studies on liquid organic hydrogen carrier: a net energy analysis", *Renewable Sustainable Energy Rev.*, Vol. 150, 2021, pp. 111447, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111447>.
6. S. Kang, J. Lee, G. Y. Cho, Y. Kim, S. Lee, S. W. Cha, and J. Bae, "Scalable fabrication process of thin-film solid oxide fuel cells with an anode functional layer design and a sputtered electrolyte", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 58, 2020, pp. 33980-33992, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.033>.
7. Y. H. Jang, S. Lee, H. Y. Shin, and J. Bae, "Development and evaluation of a 3-cell stack of metal-based solid oxide fuel cells fabricated via a sinter-joining method for auxiliary power unit applications", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 33, 2018, pp. 16215-16229, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.141>.
8. E. Shoko, B. McLellan, A. L. Dicks, and J. C. Diniz Da Costa, "Hydrogen from coal: production and utilisation technologies", *Int. J. Coal Geol.*, Vol. 65, No. 3-4, 2006, pp. 213-222, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.004>.
9. S. Lee, Y. H. Jang, H. Y. Shin, K. Lee, M. Bae, J. Kang, and J. Bae, "Reliable sealing design of metal-based solid oxide fuel cell stacks for transportation applications", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 57, 2019, pp. 30280-30292, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.087>.

10. M. K. Karmakar and A. B. Datta, "Generation of hydrogen rich gas through fluidized bed gasification of biomass", *Bioresour. Technol.*, Vol. 102, No. 2, 2011, pp. 1907-1913, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.015>.
11. H. Alidrisi and A. Demirbas, "Enhanced electricity generation using biomass materials", *Energy Sources Part A: Recovery Util. Environ. Eff.*, Vol. 38, No. 10, 2016, pp. 1419-1427, doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2014.948647>.
12. V. Kirubakaran, V. Sivaramkrishnan, R. Nalini, T. Sekar, M. Premalatha, and P. Subramanian, "A review on gasification of biomass", *Renewable Sustainable Energy Rev.*, Vol. 13, No. 1, 2009, pp. 179-186, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.001>.
13. H. Kim, Y. Kim, and J. Song, "A experiment of combustion behavior of biomass fuels", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 503-511, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.503>.
14. G. Oh, J. Y. Jang, H. W. Ra, M. W. Seo, T. Y. Mun, J. G. Lee, and S. J. Yoon, "Gasification of coal and torrefied biomass mixture", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 190-199, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.2.190>.
15. C. S. Prasad, K. N. Maiti, and R. Venugopal, "Effect of rice husk ash in whiteware compositions", *Ceram. Int.*, Vol. 27, No. 6, 2001, pp. 629-635, doi: [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(01\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(01)00010-4).
16. Y. J. Seong, and M. T. O, "Characterization of fibers originated from rice husks for replacing wood fiber", *Proceedings of the Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry Conference*, 2010, pp. 391-397. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/CFKO201024438480380.page>.
17. S. Lee, K. Lee, Y. Shin, Y. Kim, G. Lee, and J. Ahn, "Feasibility study on biomass (rice husk) power plant project in Vietnam", *New Renew. Energy*, Vol. 11, No. 1, 2015, pp. 12-19, doi: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2015.03.1.012>.
18. W. J. Cho, Y. G. Mo, T. Y. Song, Y. S. Baek, and S. S. Kim, "Synthesis gas production from gasification of woody biomass", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 21, No. 6, 2010, pp. 587-594. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO201019240638768.page>.
19. M. A. Babatabar and M. Saidi, "Hydrogen production via integrated configuration of steam gasification process of biomass and water-gas shift reaction: process simulation and optimization", *Int. J. Energy Res.*, Vol. 45, No. 13, 2021, pp. 19378-19394, doi: <https://doi.org/10.1002/er.7087>.
20. S. J. Park, M. H. Kim, and H. M. Shin, "Chemical compositions and thermal characteristics of rice husk and rice husk ash in Korea", *J. Biosyst. Eng.*, Vol. 30, No. 4, 2005, pp. 235-241, doi: <https://doi.org/10.5307/JBE.2005.30.4.235>.
21. F. M. Alptekin and M. S. Celiktas, "Review on catalytic biomass gasification for hydrogen production as a sustainable energy form and social, technological, economic, environmental, and political analysis of catalysts", *ACS Omega*, Vol. 7, No. 29, 2022, pp. 24918-24941, doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01538>.
22. E. Balu, U. Lee, and J. N. Chung, "High temperature steam gasification of woody biomass – a combined experimental and mathematical modeling approach", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 41, 2015, pp. 14104-14115, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.08.085>.
23. J. Bae, S. Lee, S. Kim, J. Oh, S. Choi, M. Bae, I. Kang, and S. P. Katikaneni, "Liquid fuel processing for hydrogen production: a review", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 44, 2016, pp. 19990-20022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.135>.