

수소 생산 규모 300 m³ h⁻¹급 글리세롤 수증기 개질반응에 대한 경제적 불확실성 분석

허주헌 · 이보름 · 김세화 · 강성목^{*,†} · 임한권^{**,†}

대구가톨릭대학교 신소재화학공학과, *대구가톨릭대학교 전자전기공학부, **울산과학기술원 에너지 및 화학공학부
(2018년 5월 10일 접수, 2018년 6월 27일 심사, 2018년 7월 12일 채택)

Economic Evaluation with Uncertainty Analysis of Glycerol Steam Reforming for the H₂ Production Capacity of 300 m³ h⁻¹

Juheon Heo, Boreum Lee, Sehwa Kim, Sung-Mook Kang^{*,†}, and Hankwon Lim^{**,†}

Department of Advanced Materials and Chemical Engineering, Catholic University of Daegu, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan, Gyeongbuk 38430, Republic of Korea

*School of Electronic and Electrical Engineering, Catholic University of Daegu, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan, Gyeongbuk 38430, Republic of Korea

**School of Energy and Chemical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, 50 UNIST-gil, Eonyang-eup, Ulju-gun, Ulsan 44919, Republic of Korea

(Received May 10, 2018; Revised June 27, 2018; Accepted July 12, 2018)

초 록

본 논문에서는 수소 생산 규모 300 m³ h⁻¹급 글리세롤 수증기 개질반응에 대한 경제적 불확실성 분석을 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 이용하여 수행하였다. 핵심 경제적 인자의 변동(± 10 - ± 40%)에 따른 수소 생산 단가의 변동을 확인하였으며, 기존 수소 생산 단가인 5.10 \$ kgH₂⁻¹를 얻기 위한 확률인 30.9%를 구하였다. 또한 설비투자비용(± 20%), 연간운영비용(± 20%), 수익(± 20%) 및 할인율의 변동(2-10%)에 따른 비용 편익비의 변동을 확인하였으며, 본 공정이 경제적 타당성이 있기 위해서는 비용 편익비의 값이 1 이상이어야 하며 이를 얻기 위한 확률 범위는 할인율의 변동에 따라 17-55%로 나타났다.

Abstract

In this paper, an economic evaluation with the uncertainty analysis using a Monte-Carlo simulation method was performed for the glycerol steam reforming to produce H₂ at a capacity of 300 m³ h⁻¹. Fluctuations in a unit H₂ production cost were identified based on the variation of key economic factors at ± 10 - ± 40% and the probability of 30.9% was obtained for a previously reported unit H₂ production cost of 5.10 \$ kgH₂⁻¹. In addition, fluctuations in the B/C ratio were obtained by varying the fixed capital investment (± 20%), cost of manufacturing (± 20%), revenue (± 20%), and discount rate (2-10%) and the probability ranging from 17 to 55% was observed to meet a minimum B/C ratio of 1 for the economic feasibility of the glycerol steam reforming to produce H₂.

Keywords: glycerol steam reforming, economic evaluation, uncertainty analysis, hydrogen production

1. 서 론

온실가스로 인한 기후 변화로 인해 온실가스에 관한 관심이 전 세

계적으로 집중되고 있는 가운데, 온실가스 감축을 위해 2016년 11월 파리기후협정이 국제적으로 발효되면서 신기후체제가 출범하였다. 그에 따라 대표적인 온실가스 배출의 원인인 화석 연료(석탄, 석유, 천연가스 등)를 대체하는 다양한 에너지원에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며 특히, 바이오매스(biomass)에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다[1,2]. 다양한 종류의 바이오매스는 다양한 공정을 거쳐 바이오디젤(biodiesel), 바이오수소(biohydrogen), 바이오알코올(bioalcohol), 합성가스(syngas)와 같은 직접적 에너지원인 바이오에너지(bioenergy)로 전환될 수 있다. 현재 바이오매스를 통한 바이오디젤 생산 공정에서는 전체 생산량의 약 10 wt%의 부산물로 글리세롤(glycerol)이 생성되며[3], 글리세롤은 식품, 화장품, 제약, 화학 산업 등 다양한 분야에 이

† Corresponding Author: S.-M Kang, Catholic University of Daegu, School of Electronic and Electrical Engineering, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan, Gyeongbuk 38430, Republic of Korea / H. Lim, Ulsan National Institute of Science and Technology, School of Energy and Chemical Engineering, 50 UNIST-gil, Eonyang-eup, Ulju-gun, Ulsan 44919, Republic of Korea
Tel: +82-52-217-2935
e-mail: kangsm@cu.ac.kr, hklim@unist.ac.kr

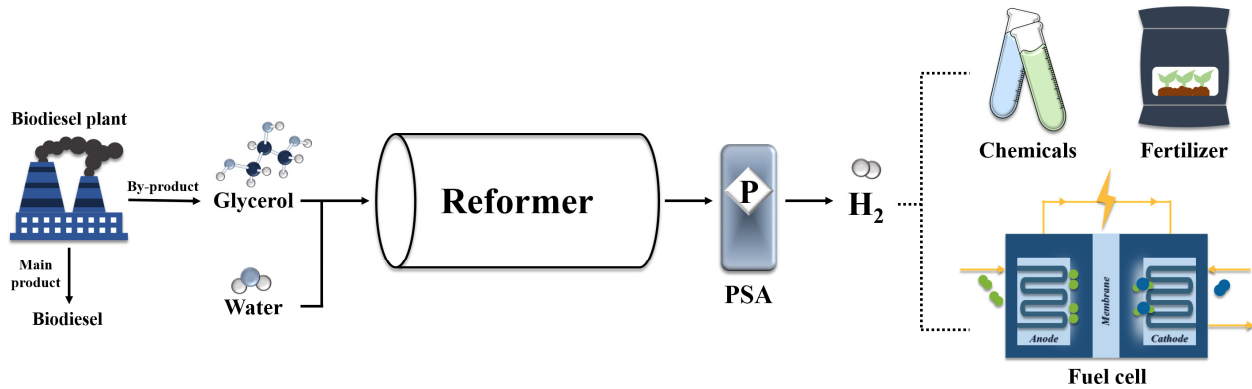
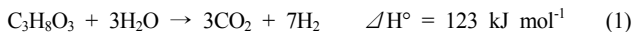


Figure 1. Schematic diagram of a glycerol steam reforming (GSR) process.

용되고 있다[4,5]. 특히 글리세롤 수증기 개질반응(glycerol steam reforming, GSR)을 통해 수소가 생산되며 생산된 수소는 에너지 캐리어로서 암모니아 합성, 화학/정제산업 및 전자산업 등에 광범위하게 사용될 수 있다[6-8]. 현재 전 세계 상업적 수소 생산 방식의 48%[9]를 차지하고 있는 메탄 수증기 개질반응(methane steam reforming, MSR)은 화석연료를 기반으로 하며 높은 효율과 비교적 저렴한 공정 운영 비용 및 촉매비용 등으로 상업적인 수소 생산 방법으로 광범위하게 사용되고 있다. 하지만, 흡열 반응인 메탄 수증기 개질반응은 원하는 수준의 메탄 전환율을 얻기 위해 고온·고압의 반응조건에서 운전되어야 한다. 이는 반응을 위해 많은 에너지가 요구되는 것뿐만 아니라 개질기의 재질 및 촉매의 선택 측면에서 큰 제한을 가진다. 더 나아가, 수성 가스 전환반응(water gas shift reaction)으로 인해 방출되는 이산화탄소는 대표적인 온실가스로 알려져 있다. 앞서 언급한 것과 같이, 전 세계적으로 환경규제가 강화되고 있는 상황에서 화석연료를 기반으로 하며 이산화탄소 방출과 같은 단점을 가진 메탄 수증기 개질 반응을 대체하면서도 효율적인 수소 생산 및 환경 규제 기준을 모두 충족시킬 수 있는 수소 생산 방법을 연구하는 것은 매우 중요한 연구분야라 할 수 있다. 따라서 화석연료 기반에서 탈피한 친환경적인 수소 생산 방식으로 인식되고 있는 글리세롤 수증기 개질반응에 대한 연구는 매우 의미 있는 시도라 볼 수 있다.

Figure 1은 글리세롤 수증기 개질반응의 전체 개략도이다. 바이오디젤 공장에서 부산물로 생성된 글리세롤과 물이 개질기(reformer)로 들어가 글리세롤 수증기 개질반응이 일어나 수소(H₂)가 생성된다(식 (1)). 생성된 수소는 압력순환흡착(pressure swing adsorption, PSA)을 거쳐 최종적으로 높은 순도를 갖는 수소를 생산할 수 있다.



지금까지 글리세롤 수증기 개질반응에 대한 연구는 지속적으로 진행되어 왔지만[10-12], 기술적 완성도가 미흡한 공정이 가질 수 있는 경제적 불확실성을 고려한 불확실성 분석(uncertainty analysis)에 대한 연구는 매우 미흡하다. 불확실성 분석은 제안된 공정의 미래의 위험성을 정량화한 경제성 분석 방법이다. Ou 등[13]은 바이오메스를 기반으로 한 수송연료 공정에 대한 불확실성 분석을 2가지 시나리오를 통해 수행하였다. Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 통해 불확실성 분석을 수행하였으며, 이를 통해 생산된 연료단가에 대한 누적확률을 분석하였다. Di Lorenzo 등[14]은 발전소에서의 CO₂ 배출량 감축에 대한 여러 가지 시나리오 중 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 통한 불

확실성 분석으로 가장 알맞은 시나리오를 판별하였으며, 이를 통해 경제적 타당성을 판별하는 인자인 순현재가치(net present value, NPV), 회수기간(payback period, PBP), 내부수익률(internal rate of return, IRR)을 구하였다. Lee 등[15]은 수소 충전소용 고압 고분자전해질 수전해(high pressure PEM water electrolysis)에 대해 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 이용하여 불확실성 분석을 진행하였다. 결과적으로 30 m³ h⁻¹급 수소 충전소용 고압 고분자전해질 수전해 전체 공정에서 경제적으로 가장 큰 영향을 미치는 인자인 수소 생산 장비, 건설비, 전기 비용, 인건비의 가격변동에 따른 수소 생산 단가의 영향과 수익(revenue, REV)의 가격 변동이 순현재가치에 미치는 영향을 확인하였다.

이전 연구인 300 m³ h⁻¹급 수소 생산을 위한 글리세롤 수증기 개질반응의 기술·경제성 분석[16]에서는 상업용 공정 설계 프로그램인 Aspen HYSYS[®]를 이용하여 공정 설계를 진행하였으며, 공정 설계 결과를 바탕으로 항목별 경제성 평가(itemized cost estimation), 민감도 분석(sensitivity analysis), 현금흐름도(cash flow diagram)를 이용한 경제성 평가를 진행하였다. 본 논문에서는 이전 경제성 평가 결과를 바탕으로 300 m³ h⁻¹급 수소 생산을 위한 글리세롤 수증기 개질반응의 경제적 불확실성 분석을 수행하여 기존의 평균값에 기반을 둔 경제성 분석이 아닌 경제적 인자들의 불확실성을 정량적으로 고려하고자 한다. 이를 통해 수소 생산 단가(unit H₂ production cost) 및 비용 편익비(B/C ratio)에 대한 변동을 확인하며 향후 수소 생산용 글리세롤 수증기 개질반응에 대한 경제성 타당성과 관련된 지침을 제시하고자 한다.

2. 실 험

2.1. 수소 생산 단가 및 현금흐름도(Unit H₂ production and cash flow diagram)

수소 생산 단가는 연간 총 투자비용을 연간 수소 생산량으로 나누어 계산한다. 연간 총 투자비용은 공정을 구성하기 위해 필요한 투자비용인 자본비(capital cost)와 공정을 운영하기 위해 필요한 비용인 운영비(operating cost)로 구성된다. 본 논문에서 진행하는 글리세롤 수증기 개질반응에서의 자본비는 반응기(reactor), 압축기(compressor), 압력순환흡착(PSA), 보충비(supplement)가 있으며, 운영비는 반응물(reactant), 압력순환흡착 운영비용(PSA operating expense, PSA OPEX), 전기 비용(electricity), 인건비(labor), 보일러에 사용하는 천연가스(natural gas), 유지 보수비(maintenance), 기타 비용(other cost)이 있다. 특히, 보충비는 반응기, 압축기, 압력순환흡착과 같은 장치들의 가격을 합한 설비투자비용(fixed capital investment, FCI)의 20%, 유지

Table 1. A Unit H₂ Production Cost for CP₀, CP_{0.05}, CP_{0.5}, CP_{0.95}, and CP₁ with Key Factor Ranges and a Fixed Discount Rate of 8%

Key factor range	Unit H ₂ production cost/ \$ kgH ₂ ⁻¹				
	CP ₀	CP _{0.05}	CP _{0.5}	CP _{0.95}	CP ₁
± 10%	4.95	5.00	5.14	5.29	5.35
± 20%	4.80	4.91	5.18	5.48	5.59
± 30%	4.65	4.81	5.23	5.67	5.84
± 40%	4.49	4.72	5.27	5.86	6.10

보수비와 기타 비용은 설비투자비용의 각각 2, 1%로 계산되었다. 프로젝트 기간은 건설기간 2년을 제외한 10년이며, Turton 등[17]이 소개한 경제성 평가 방법을 기반으로, 공정 가동률인 stream factor (SF)는 0.93, 보증금 개념인 운영 투자비용(working capital investment, WCI)은 설비투자비용의 15%, 세금 비율은 30%로 가정하였다.

2.2. Monte-Carlo 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)

본 논문에서는 확률 분석(probability analysis, PA) 방법 중 하나인 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 통하여 불확실성 분석을 수행하였다. Monte-Carlo 시뮬레이션은 구하고자 하는 수치의 확률적 분포를 반복 가능한 실험의 통계로부터 구하는 방법이다. Monte-Carlo 시뮬레이션의 장점은 적용하기 쉬우며 이론적 배경만으로 계산하기 어려운 수치들을 직접 구해야 할 때 유용한 방법이다. Monte-Carlo 시뮬레이션 수행 방법은 Turton 등[17]이 소개한 경제성 평가 방법을 기반으로 아래와 같이 진행하였다.

- ① 민감도 분석(sensitivity analysis, SA)을 수행하여 공정의 핵심 경제적 인자를 찾는다.
- ② 핵심 경제적 인자의 확률 분포를 지정한다(ex. ± 20%).
- ③ 난수(random number)를 지정하여 각각의 핵심 경제적 인자에 지정한다.
- ④ 식 (2)와 (3)을 이용하여 누적 확률(cumulative probability, CP)을 계산한다.
- ⑤ ③, ④ 과정을 여러 번 반복한다(ex. 50회).
- ⑥ ⑤번에서 얻은 결과 값을 이용하여 누적 확률 곡선을 그린다.

$$P(x) = \frac{(x-a)^2}{(c-a)(b-a)}, \quad x \leq b \text{ 일 때} \quad (2)$$

$$P(x) = \frac{(b-a)}{(c-a)} + \frac{(x-b)(2c-x-b)}{(c-a)(c-b)}, \quad x > b \text{ 일 때} \quad (3)$$

여기서, a는 최솟값(minimum value), b는 최빈값(most likely value), c는 최댓값(maximum value)이다.

본 논문에서는 이전 연구[16]에서 민감도 분석 결과를 통해 확인된 핵심 경제적 인자인 반응물과 전기 비용의 가격 변동이 수소 생산 단가에 미치는 영향을 경제적 불확실성 분석을 통해 파악하였다. 더 나아가, 설비투자비용, 연간운영비용(cost of manufacturing, COM), 수익의 변동이 비용 편익비(B/C ratio)에 미치는 영향을 경제적 불확실성 분석을 통해 확인하고자 한다.

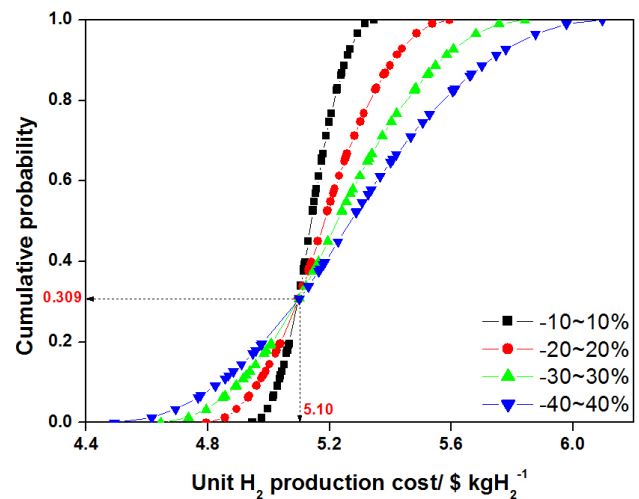


Figure 2. Cumulative probability for a unit H₂ production cost using a Monte-Carlo simulation method with key factor ranges and a fixed discount rate of 8%.

3. 결과 및 고찰

3.1. 불확실성 분석을 통한 수소 생산 단가의 변동

이전 연구[16]에서는 수소 생산 규모 300 m³ h⁻¹급 글리세롤 수증기 개질반응에 대한 수소 생산 단가를 5.10 \$ kgH₂⁻¹로 계산하였다. Figure 2는 할인율을 8%로 고정하였을 때 핵심 경제적 인자인 반응물 및 전기 비용의 값을 ± 10%에서 ± 40%까지 동시에 변동시켰을 때 수소 생산 단가에 미치는 영향을 누적 확률로 나타낸 결과이다. 핵심 경제적 인자의 범위가 커질수록 수소 생산 단가의 가격 변동은 더욱 커짐을 확인할 수 있으며, 핵심 경제적 인자의 변동이 수소 생산 단가에 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 기존 수소 생산 단가인 5.10 \$ kgH₂⁻¹[16]를 얻을 수 있는 확률은 30.9%임을 확인할 수 있으며, 이는 이전 논문에서 제시한 수소 생산 단가보다 더 높은 가격의 수소 생산 단가를 얻을 확률이 오히려 더 높음을 불확실성 분석을 통해 확인할 수 있음을 보여준다. Table 1은 핵심 경제적 인자의 변동에 대한 각각의 누적 확률을 나타낸 표이다. CP₀는 수소 생산 단가 범위의 최솟값, CP_{0.5}는 수소 생산 단가 범위의 중간값, CP₁은 수소 생산 단가 범위의 최댓값을 각각 의미한다. 또한 CP_{0.05}와 CP_{0.95} 값의 범위는 수소 생산 단가가 90% 확률로 CP_{0.05}와 CP_{0.95} 값의 범위 내에 존재한다는 것을 의미한다. 그러므로 ±10%에서 5.00-5.29 \$ kgH₂⁻¹, ± 20%에서 4.91-5.48 \$ kgH₂⁻¹, ± 30%에서 4.81-5.67 \$ kgH₂⁻¹, ± 40%에서 4.72-5.86 \$ kgH₂⁻¹의 수소 생산 단가 범위 내에 수소 생산 단가를 얻을 수 있는 확률이 90%를 의미한다. 결과적으로 불확실성 분석을 통해 핵심 경제적 인자들의 변동에 따라 단순히 하나의 수소 생산

Table 2. B/C Ratio for CP₀, CP_{0.05}, CP_{0.5}, CP_{0.95}, and CP₁ with Different Discount Rate and ± 20% Variation of FCI, COM, and REV

Discount rate	B/C ratio				
	CP ₀	CP _{0.05}	CP _{0.5}	CP _{0.95}	CP ₁
2%	0.84	0.89	1.01	1.14	1.20
4%	0.83	0.88	0.99	1.12	1.17
6%	0.81	0.86	0.97	1.10	1.15
8%	0.80	0.85	0.95	1.07	1.12
10%	0.78	0.83	0.93	1.05	1.10

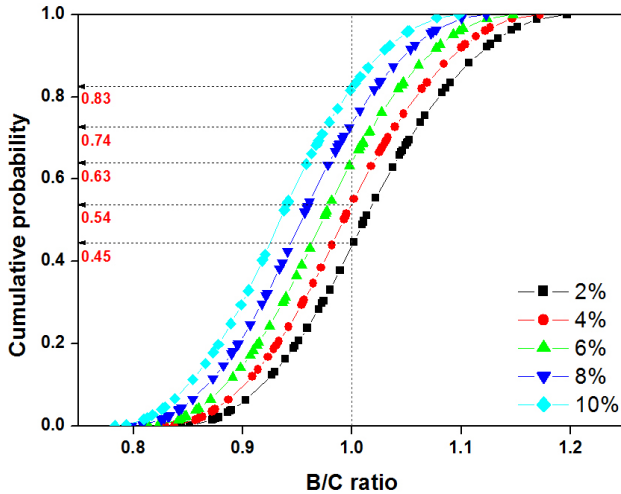


Figure 3. Cumulative probability for a B/C ratio using a Monte-Carlo simulation method with different discount rates and ± 20% variation of FCI, COM, and REV.

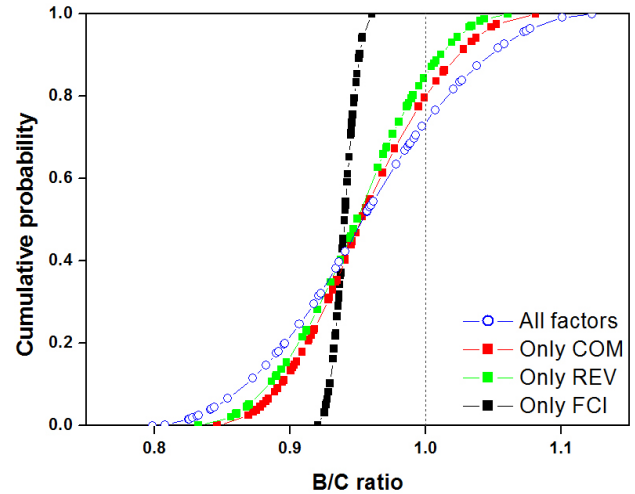


Figure 4. Cumulative probability for a B/C ratio using a Monte-Carlo simulation method with ± 20% variation of FCI, COM, and REV at a fixed discount rate of 8%.

단가가 아닌 수소 생산 단가의 범위를 확률적으로 파악함으로써 가격 변동의 불확실성에 따른 수소 생산 단가를 추측할 수 있다.

3.2. 불확실성 분석을 통한 비용 편익비(B/C ratio)의 변동

Figure 3에서는 설비투자비용, 연간운영비용, 수익이 동시에 ± 20%로 변동 되었을 때 할인율의 변화(2-10%)에 따른 비용 편익비의 변동에 대한 누적 확률 그래프를 확인할 수 있으며 Table 2에서는 각각의 누적 확률 값을 확인할 수 있다. 기본적으로 설비투자비용, 연간운영비용, 수익의 범위에 따른 비용 편익비의 변동을 그래프에서 확인할 수 있으며, 할인율이 증가할수록 그래프가 점점 왼쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 할인율의 증가에 따른 전체 수익의 감소로 인해 비용 편익비가 점점 감소된 것으로 추측할 수 있다. 현재 일반적으로 비용 편익비의 값이 1 이상일 때 제안된 공정이 경제적으로 타당성이 있다고 판별할 수 있는데, 본 논문에서 진행하는 수소 생산 규모 300 m³ h⁻¹급 글리세롤 수증기 개질반응 공정에 대해 비용 편익비의 값이 1이 넘는 확률은 할인율이 2, 4, 6, 8, 10%일 때 각각 55, 46, 37, 26, 17%이며, 할인율이 높아질수록 비용 편익비가 1이 넘는 확률이 점점 줄어들음을 확인할 수 있다. 결과적으로 비용 편익비의 범위는 설비투자비용, 연간운영비용, 수익의 변동에 따라 크게 좌우되며 할인율이 증가할수록 비용 편익비는 점점 감소함을 불확실성 분석을 통해 확인할 수 있다.

Figure 4는 할인율이 8%일 때 설비투자비용, 연간운영비용, 수익 중 하나의 변동에 따른 비용 편익비의 변동에 대한 누적 확률 그래프

이다. 설비투자비용의 변화 폭은 거의 없음을 확인할 수 있으며 수익, 연간운영비용 순으로 변화 폭이 점점 커짐을 알 수 있다. 이를 통해 설비투자비용 보다 수익 및 연간운영비용의 불확실성이 더 크다는 것을 확인할 수 있으며 공정 운영 시 연간운영비용을 관리하여 수익을 올리는 것이 설비투자비용을 관리하는 것보다 더욱 효과적임을 불확실성 분석을 통해 확인할 수 있다.

4. 결 론

수소 생산 규모 300 m³ h⁻¹급 글리세롤 수증기 개질반응에 대한 기술·경제성 평가 결과를 기반으로 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 이용한 경제적 불확실성 분석을 수행하였다. 반응물 및 전기 비용의 가격 변동 범위가 ± 10%에서 ± 40%까지 변화했을 때 수소 생산 단가에 미치는 영향을 확인하였으며 기존 연구의 수소 생산 단가인 5.10 \$ kgH₂⁻¹를 얻을 수 있는 확률은 30.9%임을 확인하였다. 핵심 경제적 인자 범위가 ± 40%일 때 가장 넓은 수소 생산 단가 범위인 4.49-6.10 \$ kgH₂⁻¹ 값을 얻었으며, 나아가 누적 확률 값인 CP₁를 통하여 각 핵심 경제적 인자 범위에 따라 수소 생산 단가를 얻을 수 있는 확률을 구하였다. 또한 설비투자비용, 연간운영비용, 수익의 변동을 각각 ± 20%로 지정한 경우 할인율에 따른 비용 편익비의 영향을 확인하였으며, 비용 편익비의 값이 1이 넘는 확률은 할인율이 낮을수록 그 값이 높아짐을 알 수 있었으며, 할인율(2-10%)에 따라 17-55%의 범위를 가진다는 것을 확인하였다.

따라서 Monte-Carlo 시뮬레이션 방법을 이용한 경제적 불확실성 분석을 통해 수소 생산 규모 300 m³ h⁻¹급 글리세롤 수증기 개질반응에 대해 경제적 요소들의 불확실한 조건에 따른 정량화된 가격의 변동을 제시하였으며, 이는 아직 상업화가 이루어지지 않은 글리세롤 수증기 개질반응 공정에 대한 중요한 경제적 지침이 될 수 있을 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20173030041290).

References

1. M. E. Sad, H. A. Duarte, C. Vignatti, C. L. Padró, and C. R. Apesteguía, Steam reforming of glycerol: Hydrogen production optimization, *Int. J. Hydrogen Energy*, **40**, 6097-6106 (2015).
2. M. S. Masnadi, R. Habibi, J. Kopyscinski, J. M. Hill, X. Bi, J. Lim, N. Ellis, and J. R. Grace, Fuel characterization and co-pyrolysis kinetics of biomass and fossil fuels, *Fuel*, **117**, 1204-1214 (2014).
3. P. D. Vaidya and A. E. Rodrigues, Glycerol reforming for hydrogen production: A review, *Chem. Eng. Technol.*, **32**, 1463-1469 (2009).
4. X. Lv, J. Lin, L. Luo, D. Zhang, S. Lei, W. Xiao, Y. Xu, Y. Gong, and Z. Liu, Enhanced enzymatic saccharification of sugarcane bagasse pretreated by sodium methoxide with glycerol, *Bioresour. Technol.*, **249**, 226-233 (2018).
5. A. Hejna, P. Kosmela, K. Formela, Ł. Piszczyk, and J. T. Haponiuk, Potential applications of crude glycerol in polymer technology—Current state and perspectives, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **66**, 449-475 (2016).
6. M. Yus, J. Soler, J. Herguido, and M. Menéndez, Glycerol steam reforming with low steam/glycerol ratio in a two-zone fluidized bed reactor, *Catal. Today*, **299**, 317-327 (2018).
7. S. Veiga, R. Faccio, D. Segobia, C. Apesteguía, and J. Bussi, Hydrogen production by crude glycerol steam reforming over Ni-La-Ti mixed oxide catalysts, *Int. J. Hydrogen Energy*, **42**, 30525-30534 (2017).
8. L. Pastor-Pérez and A. Sepúlveda-Escribano, Low temperature glycerol steam reforming on bimetallic PtSn/C catalysts: On the effect of the Sn content, *Fuel*, **194**, 222-228 (2017).
9. M. Voldsund, K. Jordal, and R. Anantharaman, Hydrogen production with CO₂ capture, *Int. J. Hydrogen Energy*, **41**, 4969-4992 (2016).
10. N. Hajjaji, A. Chahbani, Z. Khila, and M.-N. Pons, A comprehensive energy-exergy-based assessment and parametric study of a hydrogen production process using steam glycerol reforming, *Energy*, **64**, 473-483 (2014).
11. I. N. Buffoni, M. N. Gatti, G. F. Santori, F. Pompeo, and N. N. Nichio, Hydrogen from glycerol steam reforming with a platinum catalyst supported on a SiO₂-C composite, *Int. J. Hydrogen Energy*, **42**, 12967-12977 (2017).
12. A.-M. Cormos and C.-C. Cormos, Techno-economic and environmental performances of glycerol reforming for hydrogen and power production with low carbon dioxide emissions, *Int. J. Hydrogen Energy*, **42**, 7798-7810 (2017).
13. L. Ou, B. Li, Q. Dang, S. Jones, R. Brown, and M. M. Wright, Understanding uncertainties in the economic feasibility of transportation fuel production using biomass gasification and mixed alcohol synthesis, *Energy Technol.*, **4**, 441-448 (2016).
14. G. Di Lorenzo, P. Pilidis, J. Witton, and D. Probert, Monte-Carlo simulation of investment integrity and value for power-plants with carbon-capture, *Appl. Energy*, **98**, 467-478 (2012).
15. B. Lee, J. Heo, N.-H. Choi, C. Moon, S. Moo, and H. Lim, Economic evaluation with uncertainty analysis using a Monte-Carlo simulation method for hydrogen production from high pressure PEM water electrolysis in Korea, *Int. J. Hydrogen Energy*, **42**, 24612-24619 (2017).
16. J. Heo and H. Lim, Techno-economic analysis of glycerol steam reforming for H₂ production capacity of 300 m³ h⁻¹, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 209-214 (2018).
17. R. Turton, R. C. Bailie, W. B. Whiting, J. A. Shaeiwitz, and D. Bhattacharyya, *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, 4th ed., Pearson Press, New Jersey, USA (2013).