



바이오가스 이용 500 kg-H₂/d급 그린수소충전소의 수소추출시스템 공정모델링 및 경제성 분석

홍기훈 · †송형운

고등기술연구원 플랜트공정개발센터

(2021년 8월 11일 접수, 2021년 8월 25일 수정, 2021년 8월 26일 채택)

Process Modeling and Economic Analysis of Hydrogen Production System on 500 kg-H₂/d-class Green Hydrogen Station using Biogas

Gi Hoon Hong · †Hyoungwoon Song

Plant Process Development Center, Institute for Advanced Engineering, 175-28,

Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon, Yongin-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

(Received August 11, 2021; Revised August 25, 2021; Accepted August 26, 2021)

요약

본 연구에서는 충주시의 음식물바이오에너지센터로부터 음식물류폐기물의 혐기발효 처리 후 발생되는 바이오가스를 전처리 및 고질화공정을 통해 이산화탄소 및 불순물을 제거한 바이오메탄을 원료로 그린수소를 생산하는 수소추출시스템 공정을 모델링하고 경제성 분석을 수행하였다. 고질화된 바이오메탄은 개질 및 정제공정을 통해 하루 약 500 kg의 고순도 수소가 생산되며, 공정모델의 수소생산량 결과를 토대로 현재 실증을 위해 구축하고 있는 그린수소충전소 수소추출시스템의 경제성 분석을 수행하였다. 경제성 분석 결과, 수소추출시스템의 구축년도를 제외한 15년의 사업운영 후 순현재가치는 38억3천1백만 원, 수익성지수법 1.42 및 내부수익률 20.25%로 사회적 할인율 4.5%를 상회하므로 타당성 확보가 가능하다고 판단된다.

Abstract - In this paper, we carried out the process modelling and economical analysis of the 500 kg-H₂/d-class green hydrogen production system process based on biomethane from the Food Bio Energy Center in Chungju. As a result of economic analysis, the NPV(Net present value) after 15 years of operation is 3.831 billion won, the PI(Profitability index method) is 1.42. It was found that the project of 500 kg-H₂/d-class green hydrogen production system has a 20.25% of IRR, which is higher than social discount rate of 4.5% and feasibility is ensured.

Key words : biogas, green hydrogen station, process modeling, economic analysis, hydrogen production

1. 서론

최근 COP21 및 COP25 등 국제적 환경협약에 따라 세계 각국의 이산화탄소 및 대기오염물질 배출량 감축에 기여할 수 있는 에너지원의 기술개발이 크게 대두되고 있으며, 특히 전력생산(Power) 및 산업(Industry)분야 다음으로 수송(Transportation)분야에서 대기

오염 물질 배출이 증가하고 있는 추세를 보이고(Fig. 1), 유가의 증감에 따라 수송부문 배출량이 급격하게 변화함을 보여 이를 대체할 수 있는 탄소중립 에너지원에 대한 요구가 증가하고 있는 실정이다[1, 2].

다양한 대체에너지 중 수소에너지는 저장과 활용에 있어 환경적인 이슈가 적고, 천연가스의 수소추출 및 수전해를 통해 생산할 수 있어 지역적 편중에 비교적 영향이 적은 에너지원으로써 각광받고 있다. 국내에서는 2015년부터 “수소차 보급 및 시장 활성화 계획”을 관계부처 협동 하에 수립하여 2030년 수소충전

†Corresponding author:hwsong@iae.re.kr

Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

소 520개소, 수소차 63만 대와 더불어 수소차 10% 시대를 목표로 보급을 추진 중에 있으며[3], 2020년까지 수소충전소 70개소, 수소차 1.1만 대가 보급되어 운영되고 있다[4].

수소충전소는 공급방식에 따라 두 가지 형태로 나뉘는데, 다른지역의 수소 생산지로부터 생산된 수소를 튜브트레일러 또는 파이프라인을 통해 공급받아 충전하는 중앙공급방식인 오프사이트 방식(Off-site)과 도시가스, LPG 또는 수전해 등을 원료로 수소를 추출하여 직접생산, 충전하는 현장공급방식인 온사이트 방식(On-site)으로 분류된다.

현재 구축된 수소충전소는 오프사이트 방식의 충전소가 주를 이루고 있으나, 수소 생산지와 공급 거리에 따라 수소판매가에 변동폭이 있는 관계로, 최근에는 도시가스를 원료로 사용하는 온사이트 방식의 수소충전소에 보급에 관심이 높아지고 있다. 하지만 도시가스를 사용하는 방식은 수소를 생산할 때 이산화탄소가 다량 방출되는 그레이수소(gray hydrogen)이므로 탄소중립 에너지로 보기 어렵다. 이의 대안으로 태양광, 풍력 및 바이오가스 등의 신재생에너지를 이용하여 탄소중립적 수소를 생산하는 그린수소 기술이 추진되고 있다.

그린수소를 생산하는 온사이트 방식의 수소충전소의 보급확대를 위해서는 기존의 온사이트 수소충전소에 비해 사업 타당성이 확보되어야 하며, 국내에서 다양한 관점으로 경제성 및 타당성 분석 연구가 진행되어왔다.

특히, 온사이트 그린수소충전소의 경제성 분석 연구는 주로 수전해와 바이오매스의 가스화를 통한 수소생산방식이 대부분으로 Lau F. 등은 바이오매스의 가스화를 통해 생산되는 수소에 대한 경제성 분석연구를 진행하였고, 수소생산단가가 \$15/GJ의 결과를 도출하였고, Andrea M. F. 등은 로마에서의 수전해와 바이오매스 가스화 수소생산방식의 규모(65-400 kg/d)에 따른 경제성 분석연구를 진행했으며, 각각 12.71 €/kg와 5.99 €/kg로 바이오매스 가스화를 통한 수소생산이 더 저렴한 수소생산단가를 갖는 결과를 얻었다 [5, 6].

김봉진 등은 국내의 천연가스와 수전해 기반의 온사이트 수소충전소의 규모(30~300 Nm³/h)에 따른 경제성 분석을 진행하였고, 규모가 증가함에 따라 수소생산 단가는 감소함과 동시에 수전해에 비해 천연가스 수소추출방식이 더 경제성이 있음을 제시하였다 [7]. 강병우 등은 온사이트 수소충전소의 생산방식에 따른 수소충전소 구축 단가의 측면에서 경제성 분석연구를 진행하였고, 미국에 비해 국내구축 단가가 약 14% 더 높음을 확인하였다[8].

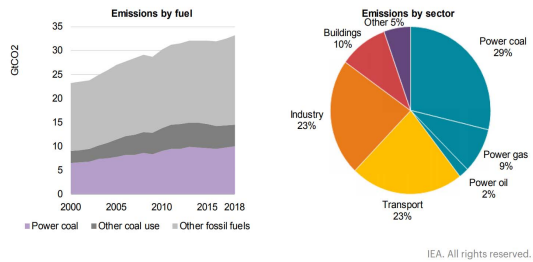


Fig. 1. Global energy-related CO₂ emissions by fuel and sector (IEA)[1].

상기 기존 문헌과 같이 국내 그레이수소 생산 수소충전소 구축 시 국외에 비해 원료의 가격차이로 경제성이 떨어지는 것을 확인할 수 있고, 국내 그린수소 생산 수소충전소 경제성 분석연구는 신재생에너지이용 수전해를 통한 그린수소 연구만 수소 존재[9]하고 바이오가스를 이용한 그린수소충전소 구축 및 운영에 대한 자료가 전무하므로 탄소중립성 수소충전소 보급을 위해 타당성 분석연구가 필요한 실정이다.

현재 충주에서 진행되는 바이오가스를 이용한 그린수소충전소는 바이오가스를 이용한 온사이트 수소충전소와 오프사이트 수소충전소에 수소를 공급하기 위한 수소출하설비가 동시에 구축되는 마더스테이션(mother station)의 국내 첫 사례이다.

이에 본 연구에서는 그린수소 생산을 위해 음식물 폐기물의 혐기발효를 통해 생산되는 바이오가스를 이용한 그린수소충전소의 수소추출시스템 공정을 모델링하고 모사결과를 통해 얻어진 수소생산량을 이용하여 손익계산서를 도출하고 현금흐름과 현재가치환산을 통한 수익성을 산출하는 경제성 및 타당성 분석 연구를 수행하였다.

II. 수소추출시스템 공정 모델링

2.1. 공정 시뮬레이션 툴

본 연구에서는 바이오가스를 이용한 500 kg/d급 그린수소충전소의 수소추출시스템 공정을 모델링하기 위해 상용 공정 시뮬레이션 툴인 Unisim Design R461.1을 사용하였다.

2.2. 바이오가스 생성량

충주시의 음식물바이오에너지센터에서 발생하는 바이오가스는 약 7,800 m³/d정도로 성분 구성은 주로 메탄과 이산화탄소로 각각 60%와 40%의 비율로 존재한다. 센터에서 자체적으로 사용되는 양을 제외한 나머지 바이오가스를 고질화 하여 바이오메탄을 생산

하며, 고질화 과정 중 메탄의 수율은 기술적으로 90% 이고, 이때 메탄의 순도는 약 97% 정도로 생산된다. 본 연구에서는 수소추출시스템에서 사용하는 바이오메탄량을 약 3,021 m³/d로 설정하고 공정모델링을 진행하였다.

2.3. 수소추출시스템 공정 모델링

(1) 수소추출시스템의 구성 및 가정

바이오가스를 원료로 고순도 수소를 생산하는 수소추출시스템은 스팀-메탄개질기(SMR, Steam methane reformer), 고온 및 저온수성가스전이반응기(HTS and LTS, High and low temperature water gas shift reactor), 오프가스버너(Offgas burner), 응축기(Condensor) 및 가스정제장치(PSA, Pressure swing adsorption unit)로 구성되고, 유입원료로는 바이오메탄, 공기 및 원료수 유입흐름을 포함한다. 바이오메탄 생성량을 기반으로 아래와 같은 가정 하에 수소추출시스템 공정 모델링을 진행하였다.

- 1) 수소추출반응기 원료 및 열원은 고질화 된 바이오메탄을 이용함
- 2) 각 장치에서의 압력강하(Pressure drop) 무시함
- 3) 각 흐름에서 열손실 없음
- 4) 열교환기에서 열교환은 이상적으로 진행됨

공정 내 변수들의 경계조건은 각 반응장치의 고유 운전조건에 맞춰 아래와 같이 고정하였다.

- 1) 공정유입 원료 초기상태는 25 °C, 100 kPa
- 2) 수소추출 원료수는 기화된 800 kPa 스팀
- 3) 수소추출 원료는 입·출구에서 885 °C, 800 kPa
- 4) HTS와 LTS의 유입온도는 각각 350 °C와 200 °C
- 5) PSA에서 수소의 회수율은 75%로 적용
- 6) 추출된 수소가스는 수소만을 포함함

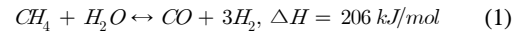
아울러 실제로는 일체형으로 구성된 수소추출반응기-버너를 구현하기 위해 공정모델 상 반응기와 별개로 구성된 버너에서 연소반응식을 적용, 방출열량을 계산하여 수소추출반응에 필요한 열량을 적용하였다.

(2) SMR, HTS 및 LTS 반응속도모델

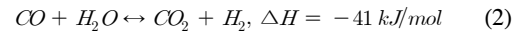
수소추출반응과 고온 및 저온수성가스전이반응은 아래 나열한 기존 문헌의 반응속도식을 적용하여 구현하였다[10-12].

1) 수소추출반응(SMR)[10]

- Steam-methane reforming(r_I)



- Water gas shift reaction(r_{II})



- Direct reforming(r_{III})

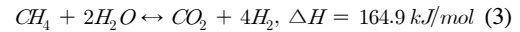


Table 1. Reaction rate constant, equilibrium constant and adsorption equilibrium constant of steam methane reforming[10]

Kinetic parameter		Unit	Value
Reaction	k _{0,I}	mol kPa ^{0.5} /g _{cat} min	7.382×10 ¹⁴
	k _{0,II}	mol/g _{cat} min kPa	3.783×10 ⁴
	k _{0,III}	mol kPa ^{0.5} /g _{cat} min	1.636×10 ¹⁴
	Ea _I	kJ/mol	261.9
	Ea _{II}	kJ/mol	38.9
	Ea _{III}	kJ/mol	243.7
Equilibrium	K _I	kPa ²	1.198 × 10 ¹⁷ exp(-26,830/T)
	K _{II}	kPa ⁰	1.767 × 10 ² exp(4,400/T)
	K _{III}	kPa ²	2.117 × 10 ¹⁵ exp(-22,430/T)
Adsorption	K _{0,CO}	kPa ⁻¹	8.825×10 ⁻⁷
	K _{0,H2}	kPa ⁻¹	6.051×10 ⁻¹¹
	K _{0,CH4}	kPa ⁻¹	7.015×10 ⁻⁶
	K _{0,H2O}		2.206×10 ⁵
	ΔH _{CO}	kJ/mol	-85.9
	ΔH _{H2}	kJ/mol	-79.7
	ΔH _{CH4}	kJ/mol	-42.3
	ΔH _{H2O}	kJ/mol	82.9

$$r_I = \frac{k_I}{P_{H_2^{25}}} \left(P_{CH_4} \cdot P_{H_2O} - \frac{P_{H_2}^3 P_{CO}}{K_I} \right) / (DEN)^2 \quad (4)$$

$$r_{II} = \frac{k_{II}}{P_{H_2}} \left(P_{CO} \cdot P_{H_2O} - \frac{P_{H_2} P_{CO_2}}{K_{II}} \right) / (DEN)^2 \quad (5)$$

$$r_{III} = \frac{k_{III}}{P_{H_2^{25}}} \left(P_{CH_4} \cdot P_{H_2O}^2 - \frac{P_{H_2}^4 P_{CO_2}}{K_{III}} \right) / (DEN)^2 \quad (6)$$

$$DEN = 1 + K_{CO} \cdot P_{CO} + K_{H_2} \cdot P_{H_2} + K_{CH_4} \cdot P_{CH_4} + K_{H_2O} \cdot P_{H_2O} / P_{H_2} \quad (7)$$

$$k_i = k_{0,i} * e^{\frac{E_a}{RT}}, i = I, II, III \quad (8)$$

$$K_j = K_{0,j} * e^{\frac{-\Delta H_j}{RT}}, j = CO, H_2, CH_4 \text{ and } H_2O \quad (9)$$

2) 수성가스전이반응(WGS)

수성가스전이반응은 운전온도에 따라 고온수성가스전이반응과 저온수성가스전이반응으로 나뉜다.

- High temperature water gas shift reaction[11]

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

- Low temperature water gas shift reaction[12]

$$\ln(K_{LTS}) = \frac{2180.6}{T} + 0.0003855 T - 2.4198 \quad (11)$$

III. 수소추출시스템 경제성 분석

3.1. 수소추출시스템 CAPEX

바이오가스 이용 그린수소충전소의 수소추출시스템 경제성 분석을 위해 CAPEX(Capital expenditure)를 실제 설비비를 기반으로 도출하였다. 수소추출시스템은 수소추출기, 유틸리티로 크게 구분되며, 제반 설치공사, 커미셔닝 및 제잡비를 포함하여 총 CAPEX는 약 29억 원으로 설정하였다.

3.2. 수소추출시스템 OPEX

바이오가스 이용 수소추출시스템의 OPEX (Operating expenditure)는 바이오가스 원료비, 수소생산 전

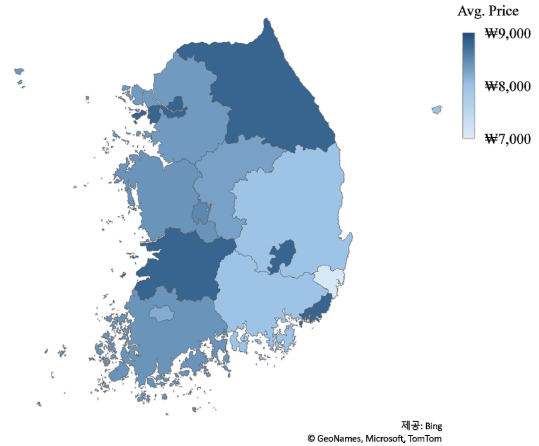


Fig. 2. Regional average price of hydrogen in Korea(H2KOREA)[13].

기요금, 판매관리비용(인건비 및 복리후생비, 유지보수비)과 법인세를 추산하였다. 원료비는 바이오가스로부터 바이오메탄을 생산하는 고질화 설비비용만 부담하는 것으로 가정하여 연간 약 1억 3천5백만 원, 전기요금은 수소추출기의 전력소모량을 고려하여 연간 약 5천1백만 원으로 계산하였다. 유지보수비용은 수소추출시스템 가격의 5%로 설정하여 연간 판매관리비용은 약 2억 4천1백만 원으로 책정하고, 법인세는 과세표준 세율에 따라 계상하였다.

3.3. 수소 판매 가격 및 세금

국내 지역별 수소충전소의 수소 판매 평균가격을 Fig. 2에 도시하였다. 가장 높은 평균가격은 8,800원/kg으로 서울, 부산, 대구, 인천, 세종, 강원과 전북이고, 가장 낮은 평균가격은 7,111원/kg인 울산으로 최저가 역시 7,000원/kg이 책정되어 판매되고 있다. 따라서 본 연구에서는 보급목표가로 7,000원/kg을 설정하였다.

3.4. 사업 기간 및 할인율

바이오가스 수소추출시스템의 총 사업 기간은 건축물 및 장비 등의 교체, 감가상각 적용연수 등을 고려하여 15년으로 설정하였고, 할인율은 예비타당성조사 수행 총괄지침 제50조 1항에 따라 사회적 할인율인 4.5%로 설정하여 수소추출시스템의 경제성 분석을 진행하였다[14].

Table 3. Profit and loss statement of 500 kg/d-class hydrogen production system using biogas

Account subjects	Amount (million won)
Profit	1,202
H ₂ -vehicle	455
Tube trailer	747
Cost of sales	186
Bio-methane	135
Electricity fee	51
Gross profit	1,016
SGA*	241
Labor	99
Employee benefits	10
Maintenance	132
EBIT**	775
Corporation tax	149
Net profit	627

*SGA: Selling, general and administrative expenses

**EBIT: Earning before interest and taxes

결과를 바탕으로 500 kg/d급 바이오가스 이용 수소추출시스템의 경제성 분석을 진행하였다.

V. 경제성 분석 결과

5.1. 손익 계산서 추정

영업수익(수소판매 매출액)과 영업비용(매출원가, 판매 및 일반관리비)을 통해 영업이익을 산출하고 법인세를 적용하여 손익 계산서를 추정하였다. 2021년 7월 현재 전국의 수소충전소의 수소차 하루 평균 충전 대수는 약 40대이고[14], 수소차 1대 당 약 5 kg의 수소를 충전할 수 있으므로 하루 수소차 충전으로 판매할 수 있는 수소충전량은 약 200 kg이다. 나머지 생산량 305 kg/d의 수소는 튜브트레일러를 통해 판매하는 것으로 가정하였다. 연간 영업이익은 약 7억 7천5백만

Table 4. Cash flow of 500 kg/d scale biogas hydrogen generation system

(Unit: million won)

Year	Cash inflow	Cash outflow	Present value	Cash flow
2021	-	2,900	-2,900	-2,900
2022	1,150	551	600	-2,300
2023	1,101	527	574	-1,726
2024	1,054	504	549	-1,177
2025	1,008	483	526	-652
2026	965	462	503	-149
2027	923	442	481	333
2028	883	423	461	793
2029	845	405	441	1,234
2030	809	387	422	1,655
2031	774	371	404	2,059
2032	741	355	386	2,445
2033	709	339	370	2,815
2034	678	325	354	3,168
2035	649	311	338	3,507
2036	621	297	324	3,831
Sum	12,912	9,081	3,831	-

원이며 법인세를 적용한 연간 순이익은 약 6억 2천7백만 원으로 산출된다. 상세 손익계산서는 Table 3에 나열하였다.

5.2. 현금흐름 및 현재가치 산출

바이오가스 수소추출시스템을 구축년도(2021년)를 제외한 15년(2022~2036년)의 사업기간동안 사회적 할인율 4.5%를 적용한 현재가치를 고려했을 때, 현금유입과 현금유출은 현재가치로 환산하면 각각 129억 1천2백만 원과 90억 8천1백만 원으로 NPV(순현재가치)는 38억 3천1백만 원이 산출되며, PI(수익성지수법)이 1.42, IRR(내부수익률)은 20.25%로 도출되었다. 현금흐름은 각각 Table 4와 Fig. 4에 표현하였다.

Cash Flow Diagram of 500 kg/d Scale Biogas Reforming and Hydrogen Production System

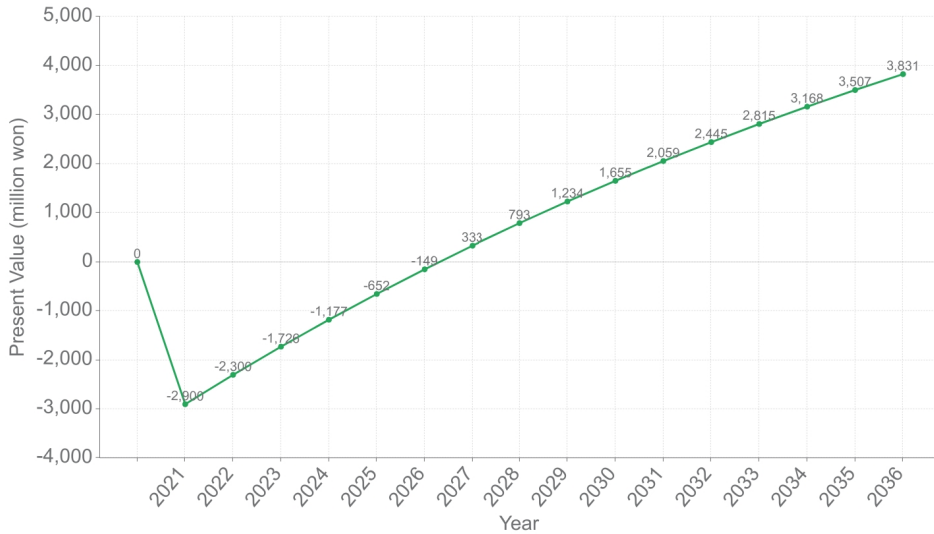


Fig. 4. Process model of 500 kg/d-class hydrogen production system using biogas.

VI. 결론

본 연구에서는 바이오가스 이용 500 kg/d급 그린수소충전소의 수소추출시스템 공정 모델링을 진행하였다. 그 결과, 바이오메탄 3,021 m³/d을 원료 수소추출시스템에서 505 kg-H₂/d의 수소를 생산할 수 있음 확인하였다. 이를 바탕으로 경제성 분석을 수행하였다. 분석결과 시스템 구축년도를 제외한 15년의 사업운영 후 순현재가치는 38억3천1백만 원, 수익성지수법 1.42 및 내부수익률 20.25%로 PBP(자본회수기간)은 약 4.3년이며, 사회적 할인율인 4.5%보다 높으므로 사업의 타당성은 확보된 것으로 판단된다.

하지만 본 연구는 수소추출시스템만을 기준으로 경제성 분석을 진행한 것으로, 추후 수소자동차를 충전하는 수소충전소의 토목, 건축, 배관, 전기 등의 공사비용과 압축기 및 저장용기 등의 장비비용을 추가하여 보다 더 상세한 타당성 분석을 통해 실제 바이오가스 이용 수소융복합충전소 운영 수익을 산출할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.(No.20193010160010)

사용기호

- E_{ai} : Activation energy of reaction [kJ/mol]
- ΔH : Enthalpy energy of reaction [kJ/mol]
- K_i : Equilibrium constant of reactions i
- K_j : Adsorption coefficient of component j
- $K_{HTS,LTS}$: Equilibrium constant of WGS reactions
- $K_{0,i}$: Pre-exponential factor of adsorption constant
- k_i : Reaction rate constants of reaction i
[I, III : mol kPa^{0.5}/g_{cat} min, II : mol/g_{cat} kPa]
- $k_{0,i}$: Pre-exponential factor of rate constant
- P_j : Partial pressure of component j [kPa]
- R : Ideal gas constant [8.314 J/mol K]
- r_i : Reaction rate of reaction i [mol/g_{cat} min]
- T : Temperature [K]
- i : I, II and III
- j : CO, H₂, CH₄ and H₂O

REFERENCES

- [1] IEA, "The role of CCUS in low-carbon power systems", (2020)
- [2] 환경부, 보도자료, "온실가스 배출량 2018년 2.5% 증가, 2019년 3.4% 감소", (2020.9.28.)
- [3] 환경부, "수소차 보급 및 시장 활성화 계획(안)", (2015.12.15.)

- [4] 환경부, “2021년 환경친화적 자동차 보급 시행계획”, (2021.4.14.)
- [5] Lau F., “*Techno economic analysis of hydrogen production by gasification of biomass*”, US DOE Technical report, (2002)
- [6] Andrea M. F., Sara R. H., Luca D. Z., Giovanni S. S., and Enrico B., “Techno-economic analysis of in-situ production by electrolysis, biomass gasification and delivery systems for hydrogen refueling stations: Rome case study”, *Energy procedia*, **148**, 82-89, (2018)
- [7] Gim B. J., and Yoon W. L., “Analysis of the economy of scale and estimation of the future hydrogen production costs at on-site hydrogen refueling stations in Korea”, *International J. of hydrogen energy*, **37**, 19138-19145, (2012)
- [8] Kang B. W., Kim T. H., and Lee T. H., “Analysis of costs for a hydrogen refueling station in Korea”, *Transactions of Korean hydrogen and new energy society*, **27**(3), 256-263, (2016)
- [9] Park J. H., Kim C. H., Cho H. S., Kim S. K., and Cho W. C., “Techno-economic analysis of Green hydrogen production system based on renewable energy sources”, *Transactions of Korean hydrogen and new energy society*, **31**(4), 337-344, (2020)
- [10] Lee H. J., Kim W. H., Lee K. B., and Yoon W. L., “Kinetic model of steam-methane reforming reactions over Ni-based catalyst”, *Korean Chemical Engineering Research*, **56**(6), 914-920, (2018)
- [11] Chinchin G. C., Denny P. J., Jennings J. R., Spencer M. S., and Waugh K. C., “Synthesis of methanol”, *Applied catalysis*, **36**, 1-65, (1988)
- [12] 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)
- [13] 수소융합얼라이언스추진단, 수소충전소위치정보시스템, <http://gis.h2korea.or.kr/>
- [14] 예비타당성조사 수행 총괄지침 제50조 1항