

폴리제너레이션 성능 모사 연구

이시황¹ · 보닷윙¹ · 이건희¹ · 정민영² · 전락영² · 오 민^{1,2†}

¹한밭대학교 대학원 화학생명공학과, ²한밭대학교 화학생명공학과

Performance Analysis of Polygeneration Process

SIHWANG LEE¹, NGUYEN VO DAT¹, GUNHEE LEE¹, MINYOUNG JUNG², RAKYOUNG JEON², MIN OH^{1,2†}

¹Department of Chemical & Biological Engineering, Graduate School of Hanbat National University, 125 Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea

²Department of Chemical & Biological Engineering, School of Hanbat National University, 125 Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea

†Corresponding author :
minoh@hanbat.ac.kr

Received 27 July, 2017
Revised 23 August, 2017
Accepted 30 August, 2017

Abstract >> Polygeneration process is widely used to pursuit high efficiency by sharing electricity, utility, refrigeration and the utilization of product chemicals. In this paper, performance analysis of the 450 MW Class polygeneration process was conducted with various syngas generated from coal and biomass gasifier. WGS and PSA process were employed for hydrogen production and separation. Process modeling and dynamic simulation was carried out, and the results were compared with NETL report. Net power of the polygeneration process was 439 MW considering power consumption. More than 90% of CO was converted at WGS and the hydrogen purity of PSA was more than 99.99%.

Key words : Polygeneration(폴리제너레이션), CCP(복합화력발전), WGS(수성가스전환 반응), PSA(압력순환흡착공정), gPROMS(지프롬스), Dynamic Simulation(동적모사)

Nomenclature

IGCC : Integrated Gasification Combined Cycle
CCP : Combined Cycle Process
WGS : Water Gas Shift Reaction
PSA : Pressure Swing Adsorption
HRSG : Heat Recovery Steam Generator
 A_{gf} : Aging fraction factor
 a : Arrhenius constant, $m^3/h \cdot g$ of catalyst
 C : Molar concentration, mol/m^3

D_{eff} : Diffusional resistances
 $D_{i,j}$: Diffusion coefficient for component i in j , m^2/s
 d_p : Particle diameter, m
 E_a : Activation energy, J/mol
 E_R : Heat of reaction, J/mol
 f_s : H_2S concentration factor
 K_{eq} : Equilibrium constant
 P : Pressure, Pa
 P_f : Pressure factor
 q_i : Amount adsorbed of component i , mol/kg

q_i^*	: Equilibrium amount adsorbed of component i , mol/kg
q_m	: Langmuir-Freundlich isotherm parameter, mol/g
$\hat{R}_{i,r}$: Reaction rate, mol/m ³ ·s
R_g	: Universal gas constant, J/mol·K
r	: Radial coordinate, m
S_h	: Total rate of generation of het, J/m ³ ·s
T	: Temperature, K
t	: Time, s
u	: Velocity, m/s
x	: Mole fraction
z	: Axial coordination, m
ρ	: Density, kg/m ³
ε	: Porosity
μ_f	: Turbulent viscosity, kg/m·s
ϵ_t	: Total bed void fraction
ϵ_b	: Interparticle void fraction
k_i^*	: LDF coefficient of component i , 1/s

1. 서론

현재 정부의 탈 원전 정책 및 이산화탄소 감축 정책의 일환으로 노후화된 원전 및 석탄화력발전소의 운전이 중지되고 있다. 이에 종래의 화력발전소 대비 높은 효율을 갖는 복합화력발전공정의 수요가 증가될 것으로 예상되고 있다. 복합화력발전 공정은 가스터빈을 이용하여 1차 발전을 수행하고, 연소 후 생성된 고온(850K)의 열원을 이용하여 고온·고압의 증기를 생산한다. 이후, 생산된 증기는 증기터빈을 통해 2차 발전을 수행한다¹⁾. 복합화력발전의 장점으로서는 1) 가스터빈의 Brayton Cycle과 스팀터빈의 Ranking Cycle을 통합 운전하여 50% 이상의 높은 공정 효율, 2) 타 발전소 대비 빠른 건설기간과 낮은 투자비, 3) 열 병합 공정을 통한 높은 운전 효율 및 지역난방공급 가능, 4) 유연성이 있는 공정운전을 통한 전력피크에 대한 유기적 대응 가능, 5) 다양한 혼합가스 적용 가능 등이 있다. 현재 우리나라에서 사용되고 있는 복합발전공정은 천연가스를 사용하는 LNG 복합화력발전소와, 석탄 가스화기를 통해 가스화합물 및 부수적인 스팀을 생성하고, 생성된 가스화합물을

가스터빈의 에너지원으로 사용하는 석탄가스화복합발전이 사용되고 있다^{2,3)}.

폴리제너레이션이란 가스화 기반의 발전소를 이용하여 전기생산과 다양한 연료 및 원료를 동시에 생산할 수 있는 통합 공정으로 석탄 가스화복합발전(IGCC), 합성천연가스(SNG), 탄소포집저장(CCS), 연료전지 및 메탄올 생산 공정을 연계하여 운영된다⁴⁾. 가스화기를 통해 저열량, 저가용 석탄으로부터 H₂, CO, CO₂, H₂S로 구성된 Acid gas를 생성한다. 이후 WGSR 및 AGR을 통해 수소의 함량 증가 및 산성가스를 제거한다. 이로부터 생성된 가스 화합물을 이용하여 전력생산 및 화학물질 생성이 가능하다. 폴리제너레이션 공정을 통해 생성가능한 주요 화합물은 수소, 메탄올, 에탄올, 암모니아, DEM가 있으며, 본 화합물을 통해 2차 전력생산의 원료 및 화학공정의 원료로 사용된다. 즉, 고효율 및 친환경 신 공정으로 배출 가스 및 대기오염 방출되는 열에너지를 낮춤으로서 전제공정의 효율을 증가시키기 때문에 전체 공정의 경제성이 높은 장점을 가지고 있다. 또한 폴리제너레이션은 다양한 에너지원(석탄, 바이오메스, 태양열, 풍력)을 사용하기 때문에 사용 원료, 통합공정의 구조 및 운전 조건에 따른 공정의 성과 분석에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다⁵⁾. 천연가스를 이용하여 전력과 메탄올을 생산하는 공정이 연구된 사례가 있으며⁶⁾, 석탄 가스화기와 CCS를 적용하여 전력과 메탄올을 생성하는 공정의 최적화 연구가 수행되었었다⁷⁾. 또한 석탄 가스화기를 이용하여 전력, 수소 및 암모니아를 생성하는 공정 모사가 수행되었으며⁸⁾, 바이오 메스 화력발전소와 에탄올 생산 공정을 통합하여 약 3.1-5.5% Point의 공정효율을 증가시킨 사례가 있다⁹⁾. 이외에도 다양한 에너지원을 이용하여 전기, 수소, 메탄올 및 암모니아를 생산하는 공정이 개발되었으며, 경제성 평가를 통한 공정 최적화 연구가 진행되었다^{10,11)}.

본 연구는 전력 생산과 수소 생산 공정을 통합한 폴리제너레이션 공정을 성능 모사 연구를 수행한 것으로, 전력생산을 위한 450 MW IGCC 공정과

수소생산을 위한 WGSR 및 PSA 공정을 선정하여 진행하였다. WGSR과 PSA를 이용하여 90-95% 순도의 수소를 생산하는 공정이 국내 연구진에 의해 개발된 사례가 있다¹²⁾. 사례 연구를 위한 기준공정으로는 NETL에서 개발된 IGCC 공정을 선정하여 수행하였으며^{13,14)}, 이후 다양한 조성의 가스 화합물이 전체 공정에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 복합화력발전 공정을 모사하기 위해 gPROMS 소프트웨어와 사전 연구로 구축된 복합화력발전 모듈을 이용하였다¹⁵⁾. 추가적으로 WGSR과 PSA의 공정모사를 위해 각 공정의 수학적 모델을 개발하여 폴리제너레이션 통합공정 동적모사를 수행하였다.

2. 이론

2.1 폴리제너레이션 공정

본 연구에 적용된 폴리제너레이션 공정은 3가지 공정(CCP, WGSR, PSA)을 통합한 것으로 복합화력발전소를 통해 450 MW 전력을 생산하고, WGSR 및 PSA를 통해 99.99% 순도의 수소를 생산하는 공정을 모사 수행하였으며, 아래의 Fig. 1에 대상공정의 개념도를 나타내었다.

2.1.1 복합화력발전 공정

본 연구에 적용된 CCP 공정은 IGCC 공정에서 가스화기 및 H₂S를 제외한 것으로 NETL 자료를 기반으로 구축되었다. 사례 연구를 위한 기준공정의 에너지원은 석탄 가스화기로부터 생성된 가스화합물로 Table 3에 정리되어 있다. 본 연구에

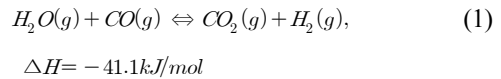


Fig. 1. Schematic diagram of polygeneration process

사용된 CCP 공정은 사전 연구 자료를 통해 수행되었다¹⁵⁾. 복합화력발전소의 동적모사를 위해 정상상태 모사가 우선적으로 수행되었으며, 정상상태 모사 결과를 통해 가스터빈, 스팀터빈, 배열회수보일러 및 복수기의 규격을 확보하여 동적모사에 반영하였다.

2.1.2 수성 가스 전화 반응 공정

WGSR은 가스화기로부터 생성된 다량의 일산화탄소 제거 및 수소 제조를 위해 사용하는 공정으로 불균일 촉매에 의해 진행되는 발열반응이며 다음과 같은 식 (1)을 통해 진행된다.



WGSR의 경우 반응기에 사용하는 촉매에 따라 고온형 반응기와 저온형 반응기로 구분할 수 있다. 일반적으로 고온형 반응기의 경우 Iron 계열의 촉매를 사용하며, 약 300-450°C에서 운전된다. 반면 저온형 반응기의 경우 Copper 계열의 촉매를 사용하며, 약 200-250°C에서 운전된다^{16,17)}. 산업공정의 경우 높은 순도가 요구되지 않을 경우 고온형 반응기를 단독으로 사용하며, 높은 순도가 요구되는 경우 고온형과 저온형 반응기를 연속으로 사용한다. 본 공정모사에 적용된 방식은 2단계 방식으로 Fig. 2와 같은 구조를 지닌다. 본 반응은 발열반응으로 온도에 따라 반응속도와 평형 전환율이 변하게 된다. 따라서 최적의 CO 전환율을 얻기 위해서 적절한 온도제어가 수행되어야 한다. 이에 본 반응기 모두 냉각 재킷 및 열교환기를 통해 반응기 온도 및 반응기로 유입되는 원료의 온도를 제어한다.

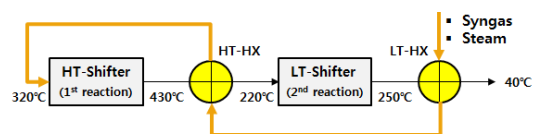


Fig. 2. Conventional two-stage WGSR Process¹⁶⁾

Table 1. Kinetics parameter for WGSR^{20,21)}

	HT reaction	LT reaction
a	2.32×10 ¹³	2.955×10 ¹³
E _a	27,760	20,960

본 연구에 적용된 촉매 및 해당 반응식을 식 (2)-(5)에 나타내었으며, 반응기 모델링에 사용된 물질 · 에너지 · 모멘텀 방정식을 식 (5)-(7)에 나타내었다. 또한 WGSR에 적용된 반응속도상수를 Table 1에 나타내었다.

Reaction kinetics of WGSR

$$\hat{R}_{i,r} = \rho_b \cdot a \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R_y T}\right) (x_{co} - x_{co}^*) \cdot D_{eff} \cdot A_{gf} \cdot P_f \cdot f_s \tag{2}$$

$$x_{co}^* = \frac{x_{H_2} \cdot x_{CO_2}}{x_{H_2O} \cdot K_{eq}} \tag{3}$$

$$K_{eq} = \exp\left(\frac{9998.22/T - 10.213 + 2.7465 \times 10^{-3} T}{R_y} - \frac{0.453 \times 10^{-6} T^2 - 0.201 \times \ln T}{R_y}\right) \tag{4}$$

$$S_h = -E_R \sum_{R=1}^{N_R} \hat{R}_{i,R} \tag{4}$$

물질 수지

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial C_i}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon u_z C_i) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon D_{i,j} \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon D_{i,j} \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon D_{i,j} \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + \hat{R}_{i,r} \end{aligned} \tag{5}$$

에너지 수지

$$\begin{aligned} \varepsilon \rho_f C_{pf} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon u_z \rho_f C_{pf} T) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon k_f \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon k_f \frac{\partial T}{\partial r} \right) + S_h \end{aligned} \tag{6}$$

압력 강하

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{180\mu(1-\varepsilon)^2}{d_p^2 \varepsilon^3} u_z \tag{7}$$

2.1.3 압력 순환 흡착 공정

PSA 공법은 미국 NASA에서 개발된 가압교대 흡착방식으로 기체 혼합물로부터 특정 성분을 분리하거나 제거시키는 기술이다. 본 연구에 적용된 흡착제는 제올라이트 5A와 활성탄으로 공정압력 변화에 따른 가스화합물의 흡착강도를 이용하여 물질을 분리하는 기술로¹²⁾, 대상 물질의 경우 고압 및 저압조건에서 수소의 흡착력이 CH₄, CO, N₂, CO₂ 대비 매우 낮은 것을 확인할 수 있다¹⁸⁾. 본 연구에 적용된 PSA 공정은 WGSR으로부터 생성된 다량의 수소를 99.99% 이상의 고순도의 수소 생성하는 공정으로, WGSR으로부터 생성된 기체화합물을 열교환기와 건조 공정을 통해 수증기 제거 및 적합한 운전온도(298 K)로 냉각시키고, 가압공정(6.5 bar)과 감압공정(1 bar)을 통해 수소를 분리한다. 즉 2단계로 운전되는 공정으로 본 공정모사의 경우 2개의 반응기를 병렬 운전하는 방식을 적용하였다. 단일 PSA의 규격은 길이(1 m)×반지름(0.24 m)이며, 공정모델링에 적용된 물질 · 모멘텀 방정식 및 흡착 매개변수를 식 (8)-(12)와 Table 2에 나타내었다.

물질 수지

$$\frac{\partial(\varepsilon_t C_i + \rho_b q_i)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} (u_z C_i) + D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \tag{8}$$

흡착 속도

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = k_i^* (q_i^* - q_i) \tag{9}$$

흡착 등온식

$$q_i^* = \frac{q_{mi} B_i P_i}{1 + \sum_{j=1}^n B_j P_j} \tag{10}$$

where,

$$q_m = k_1 + k_2 T, \quad B = k_3 \exp(k_4/T) \tag{11}$$

Table 2. Adsorption Parameter of Zeolite 5A

	H ₂	CH ₄	CO	N ₂	CO ₂
k ₁ (mol/kg)	4.314	5.833	11.8454	4.8133	10.03
k ₂ (mol/kg·K)	-0.0106	-0.01192	-0.0313	-0.00668	-0.01858
k ₃ (1/bar)	0.00252	0.0006	0.0202	0.00056	1.5781
k ₄ (K)	458	1731	763	1531	207
k* (1/s)	0.7	0.147	0.063	0.099	0.0135

압력 강하

$$\frac{\partial P}{\partial z} = - \frac{180\mu(1-\epsilon_b)^2}{d_p^2 \epsilon_b^3} u_z \quad (12)$$

2.2.1 폴리제너레이션 운전조건

본 연구는 다양한 에너지를 사용하는 폴리제너레이션 공정의 성과분석을 수행하기 위해 사례 연구를 진행하였으며, 기준공정 모사 및 사례 연구를 위해 사용된 가스화합물의 조성 및 운전 조건을 Table 3에 나타내었다. 기준 공정은 석탄가스화기를 통해 생성되었으며, Case 1, 2의 경우 바이오메스 가스화기를 통해 생성된 가스화합물로 주요 에너지원인 수소와 일산화탄소의 비율이 다른 것을 확인할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

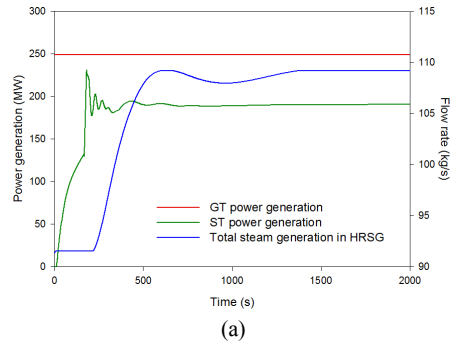
3.1 기준공정 공정 모사 결과

3.1.1 복합화력발전 공정

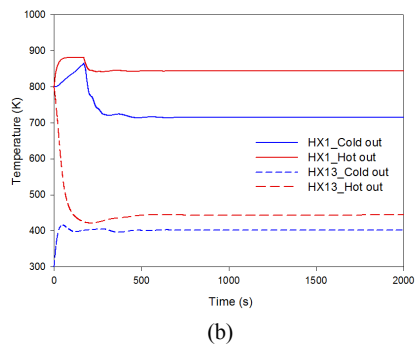
Fig. 3은 기준 자료를 기반으로 수행된 CCP 동적모사 결과로 가스터빈 및 증기터빈의 발전량 및 복수기로 유입되는 수증기의 유량 및 HRSG 전·후단에 위치한 열교환기의 온도를 나타낸 것이다. CCP 공정의 경우 가동시간으로부터 약 1,500 s 이후 정상상태 운전에 도달하였다. 가스터빈의 발전량이 일정한 이유는 유입되는 합성가스의 유입 조건이 Table 3과 같이 일정하기 때문이다. 일반적인 hot start-up 공정의 경우 약 15분 동안의 pre-start 운전 후, 약 60분 동안 start-up 공정을 수행한다¹⁹⁾. 본 연구의 경우 초기 HRSG의 내부 온도 설정을

Table 3. Syngas composition and operation conditions²²⁾

Operation condition	Value		
Temperature (K)	366		
Pressure (kPa)	2,400		
Flow rate (kg/s)	17.33 (CCP:WGSR = 84%:16%)		
Case study (fraction)	Ref.	Case 1	Case 2
N ₂	0	0	0.125
Ar	0	0	0.010
H ₂ O	0.003	0	0
CO	0.580	0.4868	0.605
H ₂	0.400	0.4966	0.221
CO ₂	0.015	0.0129	0.039
CH ₄	0.002	0.0037	0



(a)



(b)

Fig. 3. Simulation results of GT/ST turbine and HRSG, (a) power generation and steam flow rate from GT/ST, (b) temperature at the end and exit of the HRSG

정상상태 모사 결과를 기반으로 설정하여 실제 공정보다 빠르게 정상상태에 도달하는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 CCP를 통해 생산된 전력량과 HRSG 내부 열교환기의 pinch point을 나타낸 것으로 가스터빈과 스팀터빈을 통해 총 439.5 MW 전력을 생

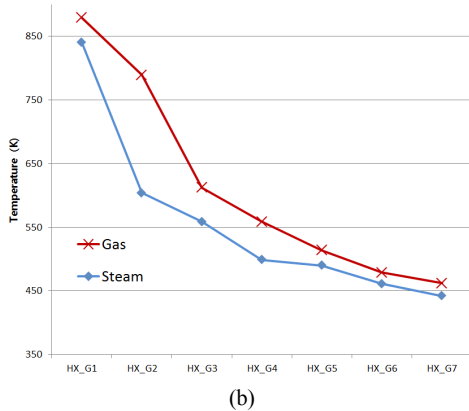
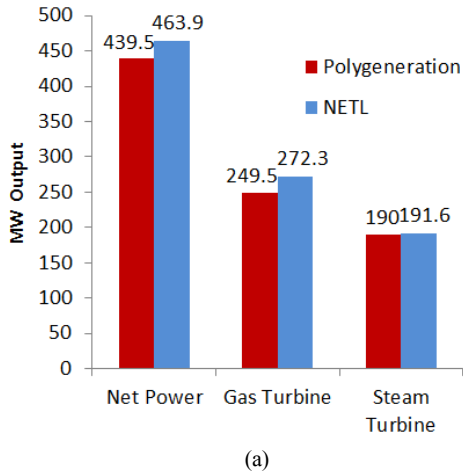


Fig. 4. Performance analysis of CCP simulation result, (a) Comparison of GT/ST power generation with NETL, (b) Pinch point of HRSG at steady state

산하는 것으로 나타났으며, NETL 자료 대비 약 5% 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다. NETL 자료의 경우 가스터빈으로 유입되는 가스화합물의 조성 및 가스터빈의 등엔트로피 효율에 대해 명시되어 있지 않았기 때문에 일반적으로 사용되는 수치를 이용하여 공정모사를 진행하였으며, 이 결과 나타나는 오차로 판단된다.

3.1.2 WGSR과 PSA 공정

Figs. 5 and 6은 WGSR과 PSA 공정 내부의 가스 조성 변화 및 압력 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5는 고온형과 저온형의 반응기 위치에 따른 기체화합

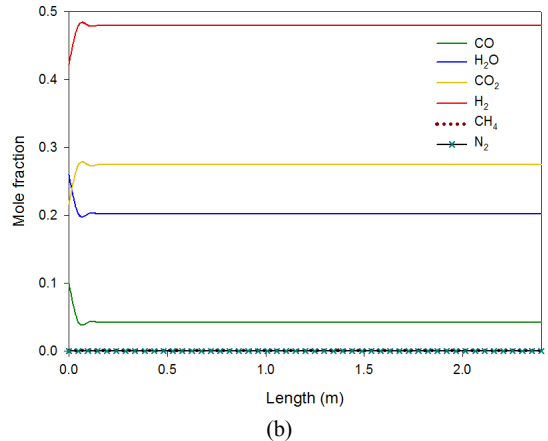
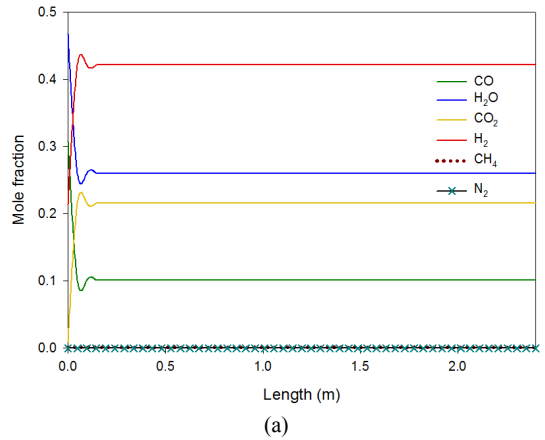
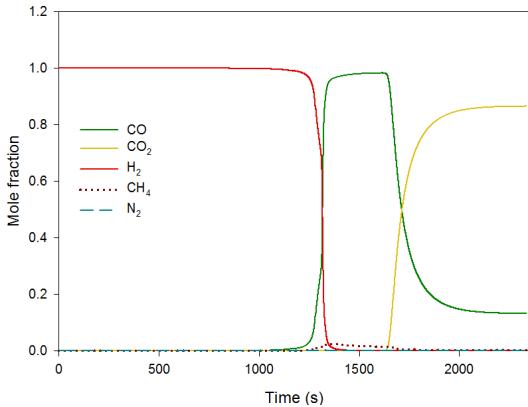


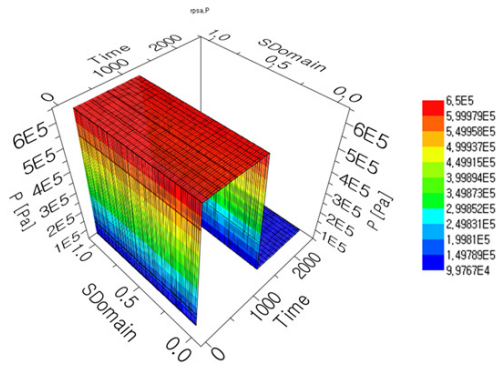
Fig. 5. Comparison of the mole fraction in the WGSR at steady state, (a) High temperature reactor, (b) Low temperature reactor

물의 물분율 변화를 나타낸 것으로, 반응기 앞에서 대부분의 반응이 진행되었으며, WGSR을 통해 수소의 물분율이 약 2.3배 증가한 것을 확인할 수 있다. 이후 생성된 가스 화합물로부터 고농도의 수소를 추출하기 위해 2단계 PSA 공정으로 유입시킨다.

Fig. 6은 시간 변화에 따른 PSA의 반응기 끝단의 가스 농도 및 내부 압력 변화를 나타내는 것으로 감압-가압 공정이 수행되는 것을 확인할 수 있다. 초기 가압공정에 수소를 제외한 가스 화합물이 제올라이트에 흡착되어 99.99% 이상의 고농도 수소가 추출되는 것을 확인할 수 있으며, 이후 진행되는 감압공정에 의해 반응기 내부에 흡착되어



(a) Mole fraction in the PSA reactor (2.4m)



(b) Pressure in the PSA reactor

Fig. 6. Simulation result of PSA, (a) Mole fraction at the exit of PSA reactor (b) Pressure in the PSA reactor

있던 기체 화합물이 흡착도에 따라 순차적(CO, CH₄, CO₂)으로 배출되는 것을 확인할 수 있다^{12,22}.

3.2 사례연구 공정 모사 결과

3.2.1 복합화력발전 공정

Table 3의 운전조건을 통해 동적모사 및 사례 연구가 진행되었다. CCP의 가스터빈으로부터 생성된 열원 온도의 경우, Case 1: 883.6으로 증가, Case 2: 881.6으로 감소하였으며, 전체 공정 발전량의 경우, Case 1: 440.3 MW로 증가, Case 2: 439.0 MW로 감소하였다. 본 결과는 CCP 공정으로 유입되는 가스혼합물의 조성을 차이에 의한 것으로 Case 2의 경우 약 13% N₂와 Ar이 포함되어 낮은 열원이 공급되기 때문으로 해석할 수 있다.

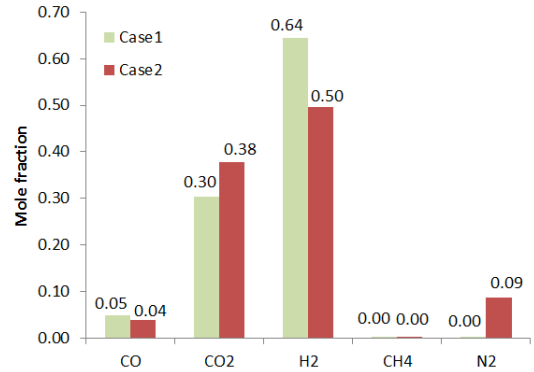


Fig. 7. Simulation result of WGSR at the exit of the reactor

3.2.2 WGSR와 PSA 공정

Fig. 7은 WGSR 및 수분제거 공정을 통해 건조된 기체 혼합물의 물분율을 나타낸 것으로 약 Case 1, 2 모두 90% 이상의 CO 전환율을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 시간 변화에 따른 PSA 반응기 끝단의 물분율 변화를 나타낸 것으로 Case 1의 경우 기준 공정과 유사한 조성의 가스 화합물을 사용하기 때문에 차이가 미미한 것을 확인할 수 있다. 반면, 기준 공정 대비 낮은 수소함량을 보이는 Case 2의 경우 공정 전환 속도가 기준 공정 대비 2배 빠른 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 상대적으로 낮은 수소비율에 의한 것으로 가압 공정시, 기준 공정 대비 상대적으로 많은 가스 화합물(N₂, CO₂, CH₄, N₂)이 제올라이트에 흡착되기 때문으로 해석된다.

4. 결론

본 연구는 전력생산 공정과 수소생산 공정을 통합한 폴리제너레이션 공정을 개발하기 위해 수행된 기초 공정모사 연구로서 복합화력발전소, WGSR 및 PSA 공정을 연계하여 총 400 MW 전력생산 및 99.99% 순도의 수소를 생산하는 공정을 목표로 수행되었으며, 석탄 및 바이오메스 가스화기로부터 생성된 가스화합물을 적용한 사례 연구를 진행함으로써 통합공정의 성과분석을 수행하였다. 본 연

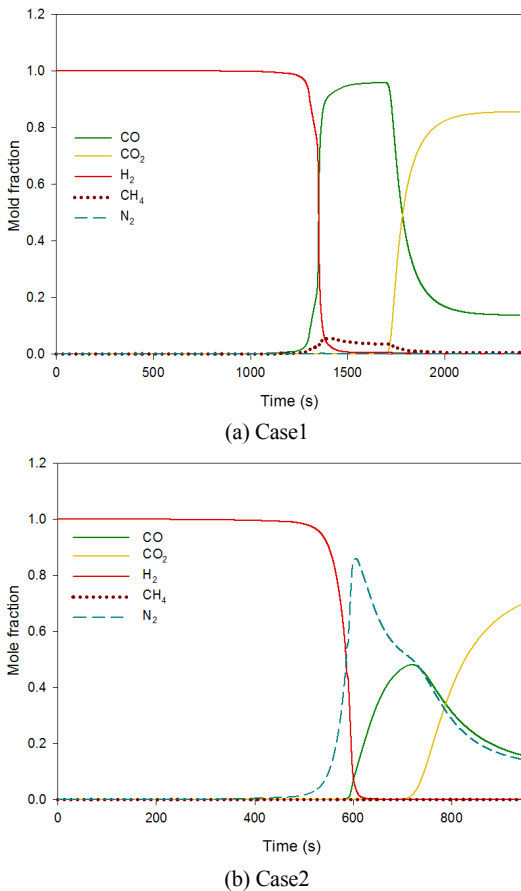


Fig. 8. Simulation result of PSA at the exit of the reactor, (a) Case1 (b) Case2

구는 동적모사를 기반으로 수행된 연구로서, 복합 화력발전 공정의 경우 사전 연구로 개발된 CCP 공정 라이브러리를 이용하였으며, WGSR과 PSA 공정은 수학적 모델링을 구축하여 동적모사를 수행하였다. WGSR의 경우 고온형 반응기와 저온형 반응기, PSA 공정의 경우 가압·감압공정 및 두 개의 반응기로 구성된 PSA 시스템을 적용하였다. 이 결과 전체 공정의 전력생산량의 경우 439.5 MW로 NETL 공정과 약 5% 이하의 오차를 나타냈다. WGSR의 경우 약 90% 이상의 일산화탄소 전환을 보였으며, PSA의 경우 약 99.99% 이상의 순도로 수소를 생산하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통하여 다양한 syngas를 통한 복합화력발전소의 전력생산량을 비교할 수 있었으며, 수소생산을 위한

WGSR 및 PSA의 운전조건 및 생산량을 예측할 수 있었다. 본 연구는 현재 개발 및 연구되어지고 있는 폴리제너레이션 공정 개발 및 연료다변화 연구의 기반자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

1. A. Tica, H. Gueguen, D. Dumur, D. Faille, and F. Davelaar, "Design of a combined cycle power plant model for optimization", *Applied Energy*, Vol. 98, 2012, p. 256-265.
2. Korea Power Exchange, "발전소 건설사업 추진현황", Korea Power Exchange, Korea, 2016.
3. 김권수, "석탄화력발전소에 대한 환경규제의 경제성 분석", Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea, 2016.
4. Ministry of Trade, Industry and Energy, New-Renewable Energy Center in the Korea Energy Management Corporation, "2016 신·재생에너지 백서", Ministry of Trade, Industry and Energy, New-Renewable Energy Center in the Korea Energy Management Corporation, Korea 2016.
5. K. Jana, A. Ray, M. M. Majoumerd, M. Assadi, and S. De, "Polygeneration as a future sustainable energy solution - A comprehensive review", *Applied Energy*, Vol. 202, 2017, pp. 88-111.
6. L. Gao, H. Li, B. Chen, H. Jin, R. Lin, and H. Hong, "Proposal of a natural gas-based polygeneration system for power and methanol production", *Energy*, Vol. 33, 2008, pp. 206-212.
7. Y. Chen, T. A. A. II, and P. I. Barton, "Optimal Design and Operation of Static Energy Polygeneration Systems", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, 2011, pp. 5099-5113.
8. K. Farhat and S. Reichelstein, "Economic value of flexible hydrogen-based polygeneration energy systems", *Applied Energy*, Vol. 164, 2016, pp. 857-870.
9. H. Song, F. Starfelt, L. Daianova, and J. Yan, "Influence of drying process on the biomass-based polygeneration system of bioethanol, power and heat", *Applied Energy*, Vol. 90, 2012, pp. 32-37.
10. L. Tock and F. Maréchal, "Thermo-environmental optimisation strategy for fuel decarbonisation process design and analysis", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 83, 2015, pp. 110-120.
11. G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, Stelios Rozakis, Konstantinos G. Arvanitis, and George Papadakis, "Polygeneration microgrids: A viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel", *Applied Energy*, Vol. 88, 2011, pp. 4517-4526.

12. M. K. Kim, S. Ahn, and C. H. Lee, "Simulation of PSA process in H₂ production process from WGSR", The Korean Society For New And Renewable Energy, spring, Vol. 5, 2008, pp. 518-521.
13. Process Engineering Division, "Shell Gasifier IGCC Base Cases PED-IGCC-98-002", National Energy Technology Laboratory, USA, 1998.
14. M. Asif, C. Bak, M. W. Saleem, and W. S. Kim, "Performance evaluation of integrated gasification combined cycle (IGCC) utilizing a blended solution of ammonia and 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) for CO₂ capture", Fuel, Vol. 160, 2015, pp. 513-524.
15. S. H. Kim, L. S. Hwang, Y. J. Joo, S. U. Lee, B. M. Shon, and M. Oh, "Process Modeling System of a Combined Cycle Plant for Steady State Simulation with Model Based Approach", Korean Chemical Engineering Research, Vol. 53, No. 5, 2015, pp. 545-552.
16. D. Mendes, A. Mendes, L. M. Madeira, A. Iulianelli, J. M. Sousa, and A. Basile, "The water-gas shift reaction: from conventional catalytic systems to Pd-based membrane reactors - a review", Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, Vol. 5, 2010, pp. 111-137.
17. R. J. Smith, M. Loganathan and M. S. Shantha, "A Review of the Water Gas Shift Reaction Kinetics", International Journal of Chemical Reactor Engineering, Vol. 8, 2010, pp. Review R4.
18. Y. H. Park, D. K. Moon, Y. H. Kim, H. W. Ahn, and C. H. Lee, "Adsorption isotherms of CO₂, CO, N₂, CH₄, Ar and H₂ on activated carbon and zeolite LiX up to 1.0 MPa", Adsorption, Vol. 20, 2014, pp. 631-647.
19. N. J. Mertens, F. Alobaid, B. Epple, and H. G. Kim, "Combined-cycle start-up procedures: Dynamic simulation and measurement", American Society of Mechanical Engineers, USA, 2016.
20. C. P. P. Singh and D. N. Saraf, "Simulation of High-Temperature Water-Gas Shift Reactors", Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, Vol. 16, No. 3, 1977, pp. 313-319.
21. C. P. P. Singh and D. N. Saraf, "Simulation of Low-Temperature Water-Gas Shift Reactors", Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, Vol. 19, No. 3, 1980, pp. 393-396.
22. D. Sánchez, R. Chacartegui, J. M. Muñoz, A. Muñoz, and T. Sánchez, "Performance analysis of a heavy duty combined cycle power plant burning various syngas fuels", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, 2010, pp. 337-345.