

수소추출기의 부분부하 운전을 위한 PSA 제어전략에 대한 연구

이상호[†] · 김선엽 · 최 영

한국기계연구원 모빌리티동력연구실

A Study on PSA Control Strategy for Part Load Operation of a Hydrogen Generator

SANGHO LEE[†], SEONYEOB KIM, YOUNG CHOI

Department of Mobility Power Research, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

[†]Corresponding author :

Sangho86@kimm.re.kr

Received 14 November, 2022

Revised 22 December, 2022

Accepted 26 December, 2022

Abstract >> Fuel cell systems are being supplied to households and buildings to reduce greenhouse gases. The fuel cell systems have problems of high cost and slow startup due to fuel processors. Greenhouse gas reduction of the fuel cell systems is also limited by using natural gas. The problems can be solved by using a hydrogen generator consisting of a reformer and pressure swing adsorption (PSA). However, part load operation of the hydrogen generator is required depending on the hydrogen consumption. In this paper, PSA operation strategies are investigated for part load of the hydrogen generator. Adsorption and purge time were changed in the range of part load ratio between from 0.5 to 1.0. As adsorption time increased, hydrogen recovery increased from 29.09% to 48.34% at 0.5 of part load ratio. Hydrogen recovery and hydrogen purity were also improved by increasing adsorption and purge time. However, hydrogen recovery dramatically decreased to 35.01% at 0.5 of part load ratio.

Key words : Hydrogen generator(수소추출기), Methane steam reformer(메탄 수증기 개질기), Pressure swing adsorption(압력 순환 흡착), Part load(부분부하), Fuel cell (연료전지)

1. 서론

온실가스 배출을 저감하기 위하여 전 세계가 노력하고 있다. 2018년에 발표된 기후 변화에 관한 정부간 협의체(international panel on climate change)의 지구온난화 1.5°C 특별보고서에서는 지구온난화가

진행되어 약 2.0°C 이상으로 정점 온도가 높아지면 기후관련 위험이 장기화되고 비가역적이라고 밝혔다¹⁾. 이에 전 세계 128개국이 탄소중립을 선언하고 정점 온도를 1.5°C 이하로 제한하기 위한 온실가스 감축 목표를 제출하고 이행현황을 점검하고 있다²⁾. 우리나라는 2030년까지 2018년 온실가스 배출량 대비

40% 감축을 목표로 하는 2030 국가 온실가스 감축 목표 상향안을 발표하였다³⁾. 특히, 건물 부문에서는 2018년 온실가스 배출량인 52.1백만 톤 CO₂eq. 대비 32.8%를 감축하여 2030년에 35.0백만 톤 CO₂eq.의 온실가스를 배출하는 내용을 포함하였다.

연료전지 시스템은 가정과 건물에서 배출되는 온실가스의 저감을 위해 보급되고 있다. 연료전지는 발전 효율이 높고 폐열을 온수로 활용해 온실가스 배출을 저감한다. 현재 가정·건물용 연료전지로는 polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)과 solid oxide fuel cell (SOFC)이 상용화되어 판매되고 있다. PEMFC 시스템은 약 60%의 종합효율을 보이며, SOFC 시스템은 약 85%의 종합효율을 보인다. 국내 가정용 연료전지는 2020년 기준으로 1,810 kW가 보급되어 있으며, 상업시설, 공공시설 및 교육시설에는 각각 1,750 kW, 976 kW 및 910 kW의 연료전지가 보급되어 있다. 발전 용량별로는 1 kW 이하가 1,308 kW, 1-3 kW 이하가 109 kW, 3-10 kW 이하가 2,010 kW 보급되었다⁴⁾. 2019년에 발표된 수소 경제 활성화 로드맵에서는 2040년까지 2.1 GW의 가정·건물용 연료전지 보급을 목표로 하고 있다⁵⁾.

가정·건물용 연료전지의 지속적인 보급을 위해서는 현재 가정·건물용 연료전지가 가지는 한계점들이 해결되어야 한다. 현재 보급되고 있는 가정·건물용 연료전지에 포함된 천연가스 연료처리기는 시동 및 부하 운전에 제약을 주고 가격이 비싸다. 저온형 연료전지인 PEMFC는 빠른 시동이 가능하고 부하 운전특성이 우수하다. 하지만 가정용 PEMFC 시스템은 600-800°C의 고온에서 작동하는 천연가스 연료처리기를 포함하여 시동까지 약 60분의 시간이 소요되고 부하운전도 제한적이다. 또한, 천연가스 연료처리기는 1-100 kW PEMFC 시스템의 전체 가격의 약 11-15%를 차지한다⁶⁾. 특히, PEMFC 시스템에 적용되는 연료처리기는 천연가스 개질기와 함께 개질가스 내 CO를 10 ppm 이하로 저감하기 위하여 water gas shift (WGS) 반응기와 preferential oxidation 반응기도 포함하여 비용이 증가한다⁷⁾. 고온에서 작동하여 연료처리기의 구성이 상대적으로 간단한 SOFC 시스

템도 천연가스 개질기를 포함하고 있다. 반면, 천연가스를 사용하는 가정·건물용 연료전지는 기존 화력 발전대비 약 30-40%의 CO₂ 저감효과가 있는 것으로 알려져 있다⁸⁾. 현재까지는 천연가스 연료처리기를 최적화하여 가정·건물용 연료전지의 발전효율을 향상시켜 CO₂ 배출을 저감하기 위한 연구가 진행되어 왔다⁹⁾. 하지만 천연가스를 사용함에 따라 발전효율 향상을 통한 CO₂ 저감에는 한계가 있다.

가정·건물용 연료전지가 천연가스 연료처리기를 포함하여 발생하는 문제는 개별의 연료처리기를 하나의 수소추출기로 구성하여 해결할 수 있다. 수소추출기에서 고순도 수소를 생산하여 다수의 가정·건물용 연료전지에 분배하여 공급하면 PEMFC 시스템은 시동과 부하운전이 용이해진다. 또한, 천연가스 연료처리기를 제외하면 연료전지 시스템이 보급되는 가격도 낮출 수 있다. CO₂ 발생도 수소추출기에 집중되어 CO₂ 포집 기술을 적용하기에도 용이하다. 하지만 수소추출기가 다수의 가정·건물용 연료전지 시스템에 수소를 공급하기 위해서는 가정·건물용 연료전지의 수소 사용량에 따른 수소추출기의 부분부하 운전이 요구된다.

본 연구에서는 수소추출기와 연료전지가 연계된 시스템에서 수소추출기의 부분부하 비에 따른 pressure swing adsorption (PSA)의 운전 전략에 대하여 연구하였다. 이를 위해 천연가스 개질기에서 공급되는 개질가스 유량 감소가 PSA의 성능에 미치는 영향을 살펴보았으며, PSA의 흡착시간과 세정시간의 변화를 통해 수소 순도와 회수율의 변화를 살펴보았다.

2. 실험

2.1 PSA 실험장치

Fig. 1은 본 실험에 사용된 PSA의 구성도를 나타낸다. 실험에 사용한 PSA 장치는 3개의 버퍼 용기와 4개의 흡착탑으로 구성하였다. 버퍼 용기는 각각 공급가스, 생성가스 및 오프가스의 압력변동을 줄이기 위하여 적용되었다. 공급가스 버퍼 용기의 전단에는

mass flow controller (M3030V, Line-Tech Inc., Daejeon, Korea)를 사용하여 천연가스 연료처리기의 WGS 반응기 후단 가스를 모사하여 78% H₂, 19% CO₂, 2% CH₄ 및 1% CO의 혼합가스가 되도록 공급하였다. 공급 유량은 부분부하 비가 1.0인 조건에서 2 L/min를 기준으로 부분부하 비에 비례하여 조정하였다. 각 흡착탑의 상단과 하단에는 5개의 솔레노이드 밸브를 설치하여 PSA공정 순서에 맞춰 작동하도록 programmable logic controller로 제어하였다. 전체 PSA공정은 다음의 7개의 공정을 기본으로 하여 Table 1과 같이 12개의 순서로 전체 사이클 시간(tc)에 대한 공정을 구성하였다.

1) 흡착(AD): 흡착탑에 공급가스가 공급되고 정제된 수소가 생산되는 공정.

2) 흡착 및 퍼지가스 공급(AD+PP): AD공정과 동시에 생성가스의 일부를 다른 흡착탑의 퍼지를 위해 공급하는 공정.

3) 감압 균압(DPE): 흡착탑 내 생성가스가 다른 흡착탑의 부분 가압에 사용되고 압력이 낮아지는 공정.

4) 블로우다운(BD): 흡착탑의 압력을 낮추고 탈착된 불순물을 배출하는 공정.

5) 퍼지(PG): 감압된 흡착탑에 생성가스를 공급하여 남아있는 불순물을 배출하는 공정.

6) 승압 균압(PPE): DPE공정의 생성가스를 공급받아 흡착탑의 압력이 부분적으로 증가하는 공정.

7) 가압(PR): 공급가스 버퍼에서 가스를 공급받아 AD공정의 압력까지 압력이 상승하는 공정.

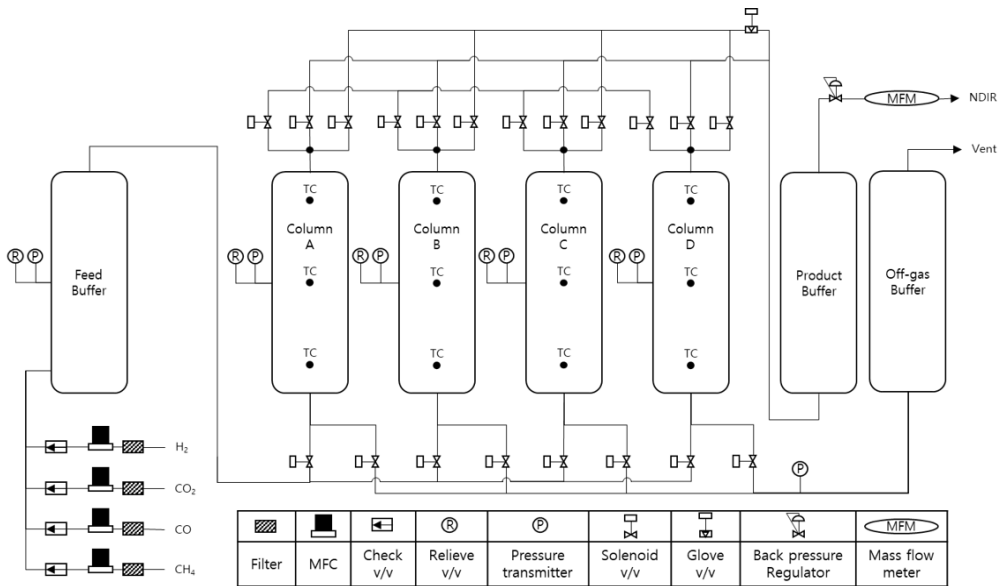


Fig. 1. The schematic diagram of the pressure swing adsorption apparatus

Table 1. Sequence of the 12-step PSA

Step no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Time, sec	tc/80	tc/20	3tc/16	tc/80	tc/20	3tc/16	tc/80	tc/20	3tc/16	tc/80	tc/20	3tc/16
Column 1	AD+PP	AD	AD+PP	DPE	BD	BD	PG	IDLE	PG	PPE	PR	PR
Column 2	PPE	PR	PR	AD+PP	AD	AD+PP	DPE	BD	BD	PG	IDLE	PG
Column 3	PG	IDLE	PG	PPE	PR	PR	AD+PP	AD	AD+PP	DPE	BD	BD
Column 4	DPE	BD	BD	PG	IDLE	PG	PPE	PR	PR	AD+PP	AD	AD+PP

흡착탑은 1 inch STS관($\Phi 25.4 \times 500$ mm)으로 제작하였으며, 활성탄(BPL, Calgon Carbon Co., Pittsburgh, PA USA)과 5A 제올라이트(CNVISION Co., Ltd., Seoul, Korea)를 이층으로 각각 150 mL와 50 mL를 장입하였다. 흡착탑에는 온도와 압력센서를 설치하여 공정에 따른 온도와 압력의 변화를 모니터링하였다. 퍼지라인에는 mass flow controller (MC-series, Alicat Scientific Inc., Tucson, AZ, USA)를 설치하여 퍼지유량을 제어하였다. 퍼지유량은 전체 실험에서 200 mL/min로 일정하게 제어하였다. 생성가스 버퍼용기 후단에는 back pressure regulator (BPR, 077S-series, Drastar Co., Ltd., Seoul, Korea)를 설치하여 공급가스 버퍼, 흡착탑 및 생성가스 버퍼의 압력을 일정하게 유지하였다. BPR 후단에는 mass flow meter (M2030V, Line-Tech Inc.)를 설치하여 생성가스 유량을 측정하였다. 생성가스의 조성은 thermal conductivity detector와 non-dispersive infrared gas analyzers 방식의 가스분석기(3000PLUS, Sensoronic Co., Ltd., Bucheon, Korea)를 통하여 측정하였다.

실험 시작 전에 흡착탑과 공급가스 버퍼 용기는 수소로 퍼지하였으며, 실험은 흡착탑과 공급가스 버퍼 용기가 각각 8 bara의 수소와 공급가스로 가압된 상태에서 시작하였다. 생성가스의 조성 및 유량이 안정화되도록 PSA공정을 반복하였으며, 공정시간이 변해도 전체 실험시간은 400분으로 동일하도록 반복 횟수를 15-30회로 조정하였다. 실험에서 사용된 수소 회수율의 정의는 식 (1)과 같다.

$$\text{수소 회수율 (\%)} = \frac{\text{생성 수소 유량 (LPM)}}{\text{공급 수소 유량 (LPM)}} \times 100 \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 개질기 부분부하 비의 영향

Fig. 2는 개질기 부분부하 비의 변화에 따른 PSA의 수소 순도, 수소 회수율, 흡착탑의 압력 및 생성 수소 유량의 변화를 나타낸다. PSA의 각 공정시간과

퍼지유량이 일정한 조건에서 공급가스의 유량을 변화하여 PSA 상단에 설치되는 천연가스 개질기의 부분부하 비가 0.5에서 1.0까지 변화하는 상황을 모사하였다. 수소 순도는 부분부하 비가 0.5에서 1.0에 따라 99.58%에서 98.93%로 감소하였다. 반면, 수소 회수율은 부분부하 비에 비례하여 생성가스의 유량이 증가하여 29.09%에서 50.50%로 증가하였다. 흡착탑의 압력도 부분부하 비의 증가와 함께 증가하

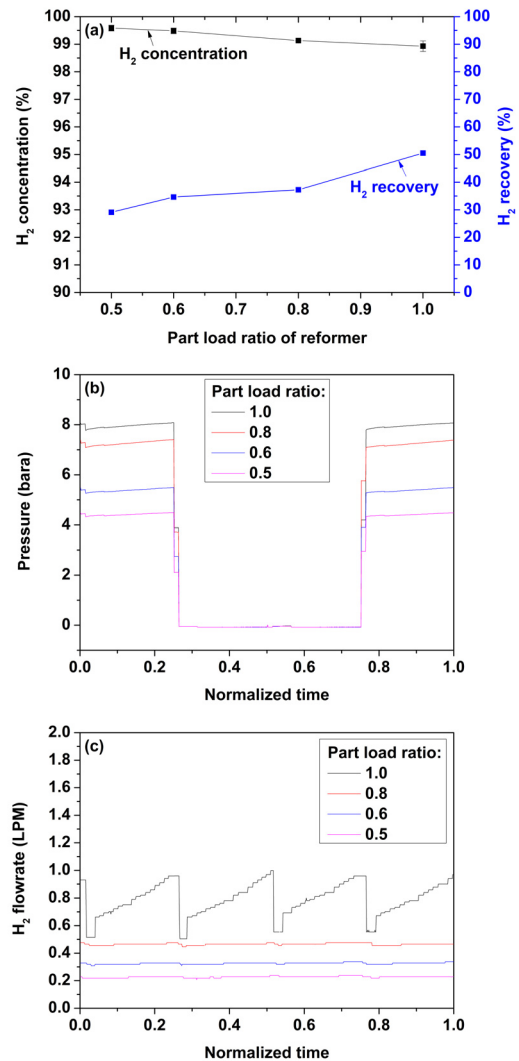


Fig. 2. The effects of part load ratio of reformer on PSA performance (a) hydrogen concentration and hydrogen recovery, (b) adsorption bed pressure profiles, (c) hydrogen product gas flow rate

였다. 부분부하 비가 0.5인 조건에서는 흡착공정이 약 4.3 bara에서 진행되었으며, 부분부하 비가 1.0인 조건에서는 약 8 bara에서 AD공정이 진행되었다. 실험에 사용된 생성가스 버퍼 용기 후단의 BPR은 다이어프램 방식으로 부분부하 비가 1.0인 조건에서 일정 압력 이상에 도달하자 생성가스 유량이 크게 증가하였지만, 부분부하 비가 0.8 이하인 조건에서는 유량이 일정하게 생성되었다. 높은 부분부하 비에서 흡착탑으로 공급되는 가스 유량이 증가하면 불순물이 흡착탑의 상단까지 전파되어 생성되는 수소의 순도는 감소하게 된다¹⁰⁾. 반면, 동일한 흡착탑에서 가압과 퍼지에 사용하는 가스 유량이 일정한 상황에서 공급가스의 유량이 증가하면 생성가스의 유량이 증가하여 수소 회수율은 증가하였다. 낮은 부분부하 비에서는 흡착탑 내 불순물의 전파가 흡착탑의 상단까지 진행되지 않고 BD공정과 PG공정이 진행되어 수소 순도는 향상된다. 하지만 잦은 BD공정과 PG공정은 가압에 많은 공급가스의 소모를 의미한다. 특히, 낮은 부분부하 비에서는 공급 유량이 낮아 PR공정에서 압력 상승과 AD공정에서 생성유량이 감소하게 된다. 이에 부분부하 비가 0.8 이하인 조건에서는 수소 회수율이 37.24% 이하로 크게 감소하였다. 따라서 상단의 천연가스 개질기의 부분부하 비가 감소함에 따라 높은 수소 회수율을 확보하기 위해서는 AD공정과 세정공정의 조정이 필요하다.

3.2 AD공정시간의 영향

Fig. 3은 부분부하 비에 반비례하여 AD공정의 시간을 조정하여 PSA의 수소 순도, 수소 회수율, 흡착탑의 압력 및 생성 수소 유량을 나타낸다. 부분부하 비가 0.5, 0.6과 0.8인 조건에서 각각 AD공정의 시간을 6 tc/20, 26 tc/120과 9 tc/80으로 증가시켜 AD공정 동안 흡착탑으로 공급되는 총 가스량이 같도록 하였다. 반면, AD+PP공정시간은 고정하여 퍼지유량과 퍼지시간은 동일하게 설정하였다. 이와 같은 운전전략은 퍼지유량을 제어하는 별도의 장치 없이 구현이 가능하다. AD공정 시간을 부분부하 비에 반비례하

여 조정하면 수소 순도는 부분부하 비가 0.5 및 0.8인 조건에서 각각 99.26%와 99.10%로 부분부하 비가 1.0인 조건보다 약 0.27-0.33%p 증가하였다. 반면, 수소 회수율은 부분부하 비가 감소한 모든 조건에서도 48.34% 이상으로 증가하였다. 부분부하 비가 0.5인 조건에서는 AD공정의 압력이 약 7 bara 수준으로 증가하였으며, 부분부하 비가 0.8인 조건에서는 BPR이 설정된 압력 이상으로 압력이 증가하여 수소 생

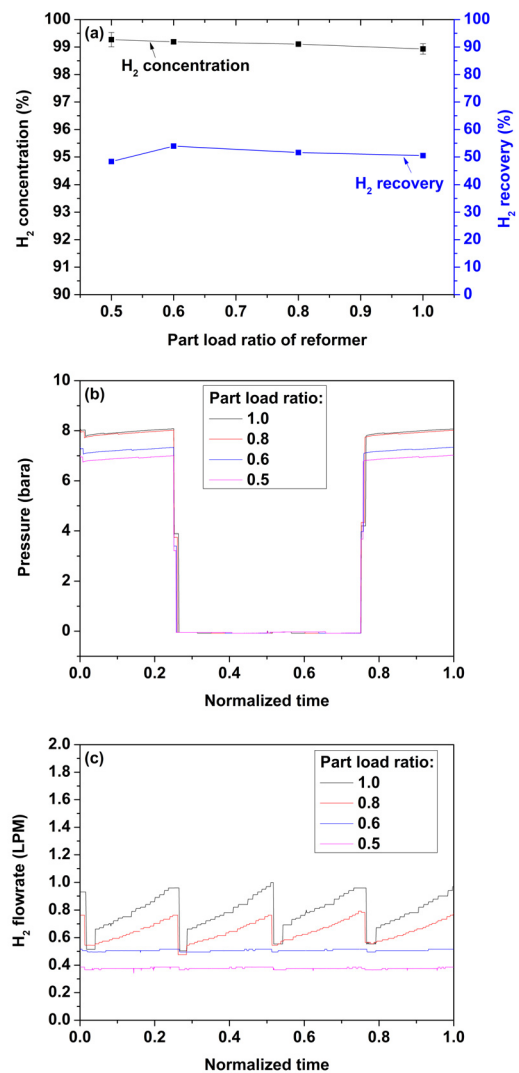


Fig. 3. The effects of part load operation with increased adsorption(AD) process time on PSA performance (a) hydrogen concentration and hydrogen recovery, (b) adsorption bed pressure profiles, (c) hydrogen product gas flow rate

성량이 크게 증가하였다. 낮은 부분부하 비에서 흡착 시간을 증가시키면 동일한 시간 동안 BD공정과 PG공정의 횡수는 감소하게 된다. 또한, AD공정시간과 함께 PR공정시간도 증가한다. 공급유량이 낮더라도 BD공정에 의한 감압 없이 PR공정이 길게 진행되어 AD공정 압력이 증가한다. 즉, 감압공정에 소모되는 공급가스의 양이 감소하여 수소 회수율이 높아지게

된다. 하지만 AD공정시간을 변화시키지 않은 조건보다 AD공정시간을 증가시키면 수소 순도는 0.03-0.32%p 감소하였다. 이는 압력에 비례하는 흡착량의 증가에 의한 수소 순도 향상보다 PG공정의 주기가 수소 순도의 향상에 효과적임을 나타낸다.

3.3 AD+PP공정시간의 영향

Fig. 4는 부분부하 비에 반비례하여 흡착 및 AD+PP공정의 시간을 조정된 결과를 보여준다. 부분부하 비가 0.5, 0.6과 0.8인 조건에서 흡착 및 AD+PP공정의 시간을 각각 7 tc/16, 17 tc/48과 tc/4로 증가시켜 흡착탑에 공급되는 가스량을 일정하게 고정하였다. 다만, 세정가스의 유량을 일정하게 하여 퍼지가스 공급 시간이 증가함에 따라 세정에 사용된 생성가스의 양은 증가한다. AD+PP공정시간이 증가함에 따라 수소의 순도는 부분부하 비가 1.0인 조건에 대비하여 0.46-0.71%p 증가하여 가장 높은 수소 순도를 보였다. 이는 AD+PP공정과 함께 PG공정시간이 증가하여 흡착탑 상단까지 전파된 불순물이 세정되기 위한 충분한 시간이 확보되어 순도가 향상된 결과로 판단된다¹¹⁾. 수소 회수율은 공정시간을 조정하지 않은 조건보다는 5.97-14.95%p 증가하였으나, AD공정 시간을 조정할 경우보다 약 4.36-13.33%p 감소하였다. 생성된 수소를 PG공정에 사용하여 수소 회수율은 감소하게 된다. 특히, 퍼지유량을 일정하게 설정하여

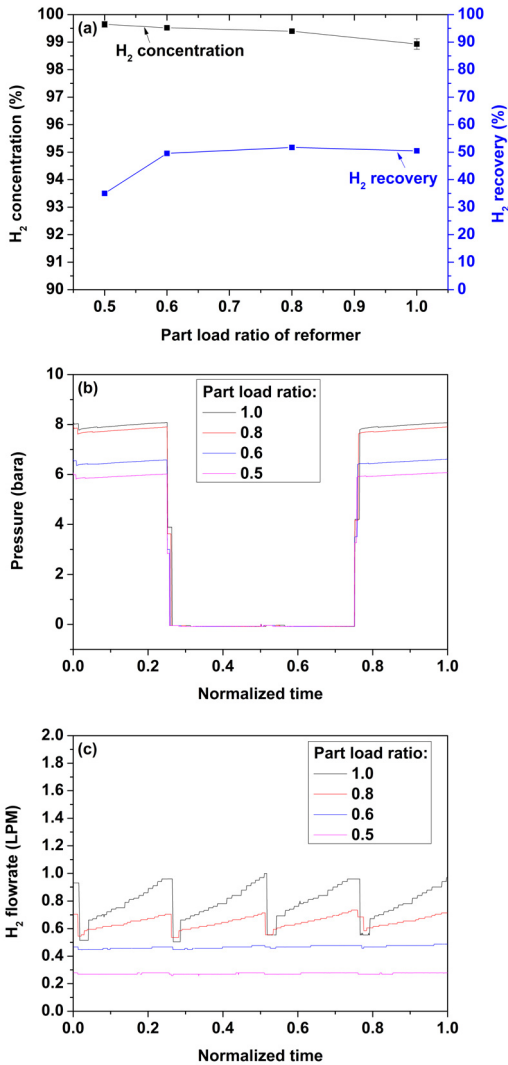


Fig. 4. The effects of part load operation with increased adsorption & provide purge (AD+PP) process time on PSA process (a) hydrogen concentration and hydrogen recovery, (b) adsorption bed pressure profiles, (c) hydrogen product gas flow rate

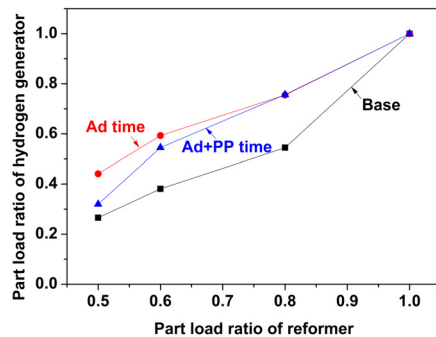


Fig. 5. The part load ratio of a hydrogen generator according to the part load ratio of a reformer

낮은 부분부하 비에서 공급되는 수소에 대한 퍼지유량의 비가 증가하게 된다. 이로 인해 부분부하 비가 0.5인 조건에서 수소 회수율이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 추후 연구에서 공급되는 수소에 대한 퍼지유량의 비를 조정하여 수소 순도를 향상시키면서 회수율을 일정하게 확보할 수 있는지 확인이 필요하다.

Fig. 5는 천연가스 개질기의 부분부하 비에 따른 수소추출기의 부분부하 비를 나타낸다. 수소추출기의 부분부하 비는 천연가스 개질기의 부분부하 비와 PSA에서 수소 회수율의 곱으로 나타낸다. PSA의 운전전략에 따라 수소 회수율이 변화하여 수소추출기의 부분부하 비가 변하게 된다. Fig. 5에서와 같이 PSA공정시간의 변화 없이 수소추출기의 부분부하 비를 0.5로 낮추기 위해서는 천연가스 개질기의 부분부하 비는 약 0.75 수준에서 운전되어야 한다. 반면, PSA의 공정시간을 조정하면 천연가스 개질기는 약 0.54-0.58의 부분부하 비에서 수소추출기의 부분부하 비가 0.5가 된다. 즉, PSA의 AD공정과 AD+PP공정시간을 천연가스 개질기의 부분부하 비에 반비례하여 증가시키면 PSA의 수소 회수율이 증가한다. PSA의 수소 회수율이 높으면 동일한 수소 생산량에서 천연가스 개질기가 운전되는 부분부하 비가 감소한다. 이를 통해 천연가스 개질기에 공급되는 연료를 감소시켜 수소추출기의 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 운전전략에 상관없이 부분부하 비가 감소함에 따라 수소 순도는 증가하는 것을 확인하였다. 다만, 부분부하 비가 1인 조건에서 수소 순도와 CO 농도는 각각 98.93%와 0.26%였다. PEMFC에 수소를 공급하기 위해서는 수소 연료 품질(KS B ISO 14687)에 규정된 99.97% 이상의 수소 농도와 0.2 ppm 이하의 CO 농도 등의 사양을 만족해야한다. 수소 순도의 향상을 위해서는 흡착제 개선, PSA공정시간 최적화 및 vacuum pressure swing adsorption 적용 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 수소추출기의 부분부하 비에 따른 PSA의 운전전략에 대하여 연구하였다. 천연가스 개질기의 부분부하 비가 PSA의 성능에 미치는 영향을 살펴보았으며, 수소 순도와 수소 회수율을 향상시키기 위해 흡착시간과 세정시간의 영향을 살펴보았다.

1) PSA의 공정시간을 변화시키지 않고 천연가스 개질기의 부분부하 비가 감소하면 수소 순도는 증가하였지만, 부분부하 비가 0.8 이하에서 수소 회수율이 37.24% 이하로 크게 감소하였다.

2) 천연가스 개질기의 부분부하 비에 반비례하여 AD공정시간을 조정하면 수소 회수율은 모든 부분부하 비에서 48.34% 이상으로 증가하였다. 하지만 AD공정시간을 변화시키지 않은 조건보다 AD공정시간을 증가시키면 수소 순도는 0.03-0.32%p 감소하였다.

3) 천연가스 개질기의 부분부하 비에 반비례하여 AD+PP공정시간을 증가시키면 모든 부분부하 비에 가장 높은 수소 순도를 보였으나, AD공정시간을 조정할 경우보다 약 4.36-13.33%p 낮은 수소 회수율을 보였다.

4) PSA의 AD공정 또는 AD+PP공정시간을 부분부하 비에 반비례하여 증가시키면 PSA의 수소 회수율이 증가한다. PSA의 수소 회수율이 높으면 동일한 수소 생산량에서 천연가스 개질기가 운전되는 부분부하 비가 감소한다. 이를 통해 천연가스 개질기에 공급되는 연료를 감소시켜 수소추출기의 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업인 “공공건물 대상 수소추출기 연계형 연료전지 안전실증(과제번호: 20203040030110)”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Korea Meteorological Administration (KMA), “Global Warming of 1.5°C SPECIAL REPORT」 Commentary ed.,” KMA, 2022. Retrieved from <https://www.gihoo.or.kr/download/downloadFile.do;jsessionid=IxldHuW1q7YCT2aGCDS5yvi28G5CDkLeN2vcrtRldMoMTT5dpTQgJntzZ1pVthn?attFileNo=20039>.
2. G. Lee and M. Lee, “Carbon-neutral technology policy trends in major countries: Trend analysis on carbon-neutral technology policy of G7 countries and proposal of domestic policy direction,” GTC Focus, Vol. 2, No. 1, 2021. Retrieved from <https://www.gtck.re.kr/gtck/gtcPublication.do?mode=view&articleNo=2432&article.offset=30&articleLimit=10&srSearchVal=%ED%83%84%EC%86%8C>.
3. Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth (CNC), “The enhanced update of 2030 nationally determined contribution,” CNC, 2021. Retrieved from <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=100&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=12>.
4. New & Renewable Energy Policy Division, “New & Renewable Energy Statistics 2020,” Korea Energy Agency, 2021. Retrieved from <https://www.knrec.or.kr/biz/pds/statistic/view.do?no=120>.
5. Ministry of Trade, Industry and Energy, “Korea Hydrogen Economy Roadmap,” Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019. Retrieved from http://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=161262&bbs_cd_n=81¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v.
6. B. D. James and D. A. DeSantis, “Manufacturing cost and installed price analysis of stationary fuel cell systems”, Strategic Analysis Inc., 2015. Retrieved from https://www.sainc.com/assets/site_18/files/publications/sa%202015%20manufacturing%20cost%20and%20installed%20price%20of%20stationary%20fuel%20cell%20systems_rev3.pdf.
7. Y. Seo, D. J. Seo, Y. S. Seo, H. S. Roh, J. H. Jeong, and W. L. Yoon, “Performance of Ru-based preferential oxidation catalyst and natural gas fuel processing system for 1 kW class PEMFCs system”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 17, No. 3, 2006, pp. 293-300. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/JAKO200621036737261.pdf>.
8. J. D. Kim, “Currnet status and prospect of residential fuel cell monitoring project”, KIPE Magazine, Vol. 13, No. 3, 2008, pp. 21-24. Retrieved from <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200821041232075.pdf>.
9. S. H. Park, C. M. Kim, S. H. Son, S. J. Jang, J. D. Kim, W. K. Bang, and S. Y. Lee, “Research of high efficiency integrated reforming system using separated reforming system”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 29, No. 1, 2018, pp. 11-18, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.1.11>.
10. A. M. Ribeiro, C. A. Grande, F. V. S. Lopes, J. M. Loureiro, and A. E. Rodrigues, “A parametric study of layered bed PSA for hydrogen purification”, Chemical Engineering Science, Vol. 63, No. 21, 2008, pp. 5258-5273, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.07.017>.
11. H. Li, Z. Liao, J. Sun, B. Jiang, J. Wang, and Y. Yang, “Modelling and simulation of two-bed PSA process for separating H₂ from methane steam reforming”, Chinese Journal of Chemical Engineering, Vol. 27, No. 8, 2019, pp. 1870-1878, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.11.022>.