

Compact H₂ PSA 공정을 위한 흡착탑의 설계

이장재*, 이상진, 문중호, 최대기, 이창하

Design of adsorption bed for Compact H₂ PSA process

Jang-Jae Lee, Sang-Jin Lee, Jong-Ho Moon, Dae-Ki Choi, Chang-Ha Lee

Abstract 수소 station의 수소분리정제를 위한 compact형 PSA 공정을 연구하였다. 기존 PSA 공정의 흡착탑이 차지하는 시스템의 공간을 줄이기 위하여 하나의 흡착탑 안에 다른 흡착탑을 넣어 흡착탑이 차지하는 공간을 최소화하였으며, 흡착탑 간의 열교환이 효과적으로 일어나도록 설계하였다. 수소 혼합물에 대한 활성탄으로 충전된 dual bed에서의 수소 혼합물에 대한 흡/탈착 동특성 실험을 실시하였으며, 시간에 따른 농도와 온도의 변화를 측정하였다. 수소 혼합물로는 H₂/CO/CH₄/CO₂ (69:2:3:26 vol.%)를 사용하였으며, 흡착유량은 7LPM, 흡착압력은 9atm 조건에서 운전하였다. Inner bed와 outer bed의 성능은 각각의 열전달 특성의 차이로 인하여 다르게 나타났으나, 단일탑의 동특성보다는 우수한 성능을 보이고 있었다. 따라서 개발된 dual bed는 적은 부지를 차지하면서도, 보다 우수한 수소 분리 성능을 보일 수 있는 PSA 공정에 응용될 수 있음을 확인하였다.

Key words Key words:Hydrogen(수소), Dual adsorption bed (이중 흡착탑), breakthrough(파과), PSA(압력 순환식 흡착), activated carbon (활성탄)

* 연세대학교 화학공학과

□ E-mail : morningjj@yonsei.ac.kr □ Tel : (02)2123-3554(ex32) □ Fax : (02)312-6401

1. 서론

산업의 발달과 더불어 화석 연료의 고갈과 환경 문제가 대두되고 있는 시점에서 수소는 청정 에너지원으로 많은 분야에서 각광을 받고 있다. 수소는 모든 원소 중에서 가장 가벼우며 또한 연소시에 다른 오염물질을 배출하지 않아서 환경적으로 무해한 에너지원 중 하나이다. 이러한 수소는 수증기 개질법을 비롯한 여러 방법으로 제조되고 있다.

또한, 제철소, 에틸렌공장, 암모니아공장 등의 배출가스로부터 수소를 회수하는 방법도 여러 분야에서 연구되고 있다. 현재 대규모의 수소 제조에서는 천연가스를 활용하여 제조하는 방법이 대부분이다.¹⁾

수소 분리방법 중에서 PSA(pressure swing adsorption; 압력 순환식 흡착) 공정은 흡착법을 이용한 분리 공정이다. 수소분리의 경우 천연가스 또는 나프타의 촉매증기개질로부터의 배가스, 제철소 부생가스 (COG : Coke Oven Gas) 등으로부터 많은 양의 수소를 고순도로 얻을 수 있으므로 가장 널리 상용화되었다. 여러 가지의 수소원에 따라서 주요 불순물 및 조성에 차이가 있고, PSA 공정의 운전 상황이 다를 뿐 아니라 목적하고자 하는 생성물의 종류나 순도가 각각의 공정마다 다르므로, 많은 종류의 수소 PSA 공정이 개발 되었고, 또한 현재에도 보다 효율이 높은 공정을 개발 중에 있다. 그 중에 대표적인 것으로는 Union carbide 사의 세 개의 흡착탄균과 여섯 개의 흡착탄균을 직렬로 연결하여 고순도의 수소가스와 연료가스를

동시에 얻을 수 있는 공정을 개발하였다. 이들 공정이 생산할 수 있는 수소의 순도는 99.99+% 이고, 회수율은 85, 90% 에 이른다고 알려져 있다.²⁾

특히 최근 주목 받고 있는 수소 station에서는 생산된 수소를 분리정제하기 위하여 다양한 형태의 PSA 공정이 적용되고 있다. 현재 수소 station에 있어 분리가 차지하는 공간이 문제점으로 지적되고 있는 상황에서 성공적인 수소 station을 구축하기 위해서는 수소 PSA 공정이 compact하게 설계될 필요가 있으며, 이를 통하여 목적하는 순도의 생산물이 얻어져야 한다.

본 연구에서는 수소 station에 활용될 PSA 공정의 compact화를 위하여 dual bed 형태의 흡착탑을 설계 하였으며, 이 흡착탑의 흡착 동특성을 연구하였다. 또한 탑 간의 열교환을 원활히 하여 흡착탑의 성능을 향상하고자 하였다.

2. 실험

2.1 흡착제 및 흡착질

본 실험에서는 활성탄(PCB, Calgon co.)을 흡착제로 사용하였다. 활성탄은 일반적으로 흡착열 또는 결합세기가 다른 흡착제보다 작아 흡착분자들의 탈착이 더 쉽고, 흡착제 재생을 위한 에너지 소요는 작다. 활성탄은 평균크기 6~16mesh의 입상 활성탄으로 150℃에서 6시간 이상 활성화 하였다. 파과실험을 위한 흡착질은 주요 수소가스 혼합물원의 조성에 근거하여 용적비가 69: 2: 3: 26인 4성분계 H₂/CO/CH₄/CO₂ 혼합기체를 공급류로 이용하였다. 본 실험에 쓰인 흡착탑의 특성을 Table 1에 나타내었다

Table 1. Characteristics of adsorbent

	Activated carbon
type	Granular
pellet size	10-12 mesh
pellet density	0.85 g/cm ³
bulk density	0.482 g/cm ³
External void fraction	0.433
Heat capacity	0.25 cal/g K

2.2 파과 및 재생 실험장치

파과 실험 및 재생실험을 위한 dual bed 실험장치는 Fig.1과 같다. 흡착탑의 길이 100cm, 내경은 inner bed가 3.15cm, outer bed는 4.75cm로 제작되었고, 흐름라인은 1/4in. sus tube를 사용하였으며 그 밖에 특징은 Table 2와 같다. 실험 중 흡착탑으로 부터 미세입자의 유출을 방지하기 위해 탑의 상단과 하단에 glass wool과 미세철망을 압축시켜 설치하였다. 기체흐름을 조절하기 위한 솔레노이드 밸브를 적절한 위치에 설치하였고, 탑 내부의 온도변화와 압력을 측정하기 위해 공급단에서 부터 inner bed의 10cm, 90cm, outer bed의 10cm, 30cm, 50cm와 75cm 지점에 RTD(residence temperature detector, Pt 100 Ω)를 설치하여 탑 중앙부의 온도를 측정하였고, 탑의 상단에 pressure gauge를 그리고 상단과 하단에 pressure transducer를 설치하였다. 파과 중에 일정한 유량으로 혼합기체를 공급하기 위해 MFC (mass flow controller, Bronkhorst High-tech)를 공급단 (feed end) 부근에, 그리고 탑내 압력을 일정하게 유지시키기 위해 BPR (electrical back pressure regulator)을 생성단 (product end) 부근에 설치하였는데 이들 압력, 온도, 유량 등은 interface를 통해 시간에 따라 컴퓨터에 저장되게 하였다. MFC는 H₂/CO/CH₄/CO₂ (69: 2: 3: 26 vol.%) 혼합가스에 맞도록 wet gas meter를 이용하여 적절한 보정 factor를 적용하였다. 배출부 끝단의 기체조성은 시료채취구로부터 mass spectrometer (Balzers Quadstar 421)를 사용하여 일정시간 간격으로 분석하였다.³⁾

Dual bed와 단일탑의 효능 비교를 위하여 dual bed 뿐만 아니라 단일탑의 파과 실험도 시행하였다. 단일탑의 길이는 100cm, 내경은 3.5cm로 하였으며 RTD는 탑의 공급단에서부터 10cm, 30cm, 50cm, 75cm 지점에 설치하였고 나머지 조건은 같게 하였다. 본 연구에서 사용된 두 가지 탑의 모양을 Fig.2에 나타내었다.

Table 2. Characteristics of Dual bed

	Dual bed	
	Inner bed	Outer bed
length	100 cm	100 cm
inside diameter	3.160 cm	4.745 cm
outside diameter	3.540 cm	6.800 cm
materials of wall	Brass	stainless steel
heat capacity of wall	0.0898 cal/g K	0.1200 cal/g K
density of wall	8.47 g/cm ³	7.83 g/cm ³

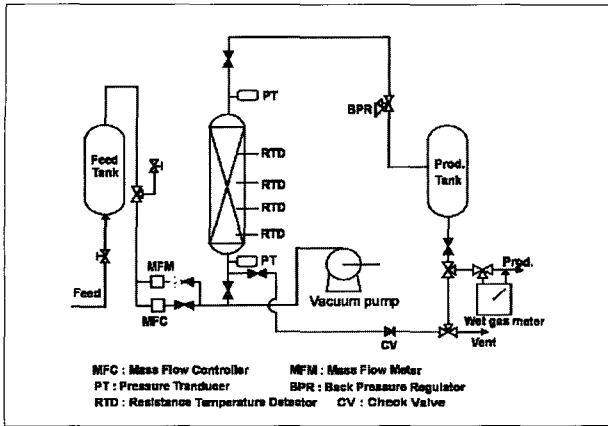


Fig.1 Schematic diagram of apparatus for breakthrough experiment

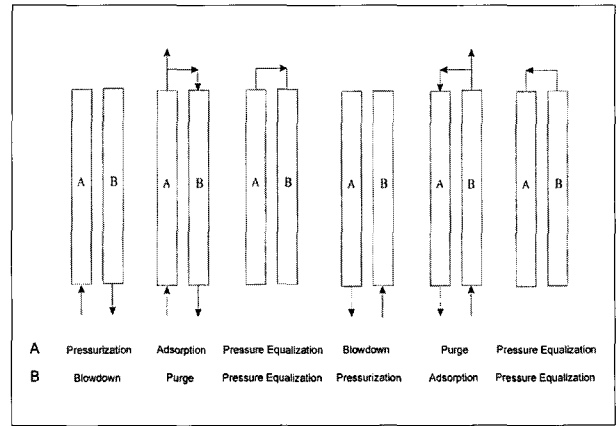


Fig.3 Cycle sequence of PSA process

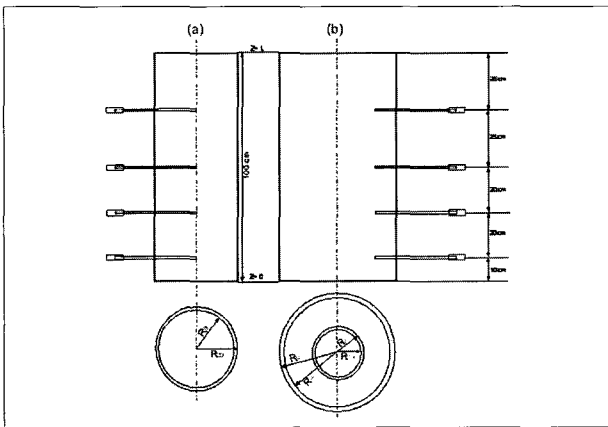


Fig.2 Schematic diagram and spatial coordinate of (a) the conventional adsorption bed and (b) the compact dual bed

2.3 PSA 공정 실험 방법

Dual bed의 PSA 공정 실험은 inner bed를 bed1, outer bed를 bed2로 정해서 공급 유량 7 LPM, 흡착 압력 9atm, 정화 유량 0.81 LPM 조건에서 실험을 하였다. PSA 공정은 가압(FP), 흡착(AD), 감압 압력 평등화(DPE), 감압(BD), 가압 압력 평등화(PPE)의 6단계의 과정을 거친다. 각 단계의 step time 은 기본적으로 15, 180, 20, 15, 180, 20이고, Dual bed의 특성상 15, 160, 20, 15, 200, 20 으로 바꾸어 실험 하였다. 위에서 설명한 공정의 간단한 공정 흐름도를 Fig.3 에 나타내었다.

3. 결과

3.1 Dual bed 흡착 실험

흡착압력 9 atm, 유량 7 LPM의 조건에서 inner bed와 outer bed의 파과실험 결과를 Fig.4와 5에 나타내었다. 그리고 파과실험에 따른 온도의 변화를 Fig.6와 7에 나타내었다. Fig.4과 5에서 알 수 있듯이 수소의 순도는 가장 먼저 파과가 일어나는 CO와 그 다음으로 파과가 일어나는 CH₄의 영향으로 천천히 떨어진다. 그 후엔 CO₂의 영향으로 급격한 변화를 나타낸다. 한편 강흡착질인 CO₂의 영향으로 CO와 CH₄는 경쟁흡착에서 밀려서 roll-up 현상을 보인다. 그러므로 PSA 공정에서는 강흡착질인 CO₂의 영향을 많이 받게 된다. 그러나 가장 먼저 파과가 일어나는 CO가 PSA 공정에서 생산되는 수소의 주요 불순물로 작용할 것을 예측할 수 있다.

또한 그림에서 볼 수 있듯이 outer bed의 경우 CO의 roll-up이 inner bed 보다 미약하며, CO₂의 경우 파과 곡선의 tailing이 상대적으로 적다. 이러한 결과로 인하여 수소 파과 곡선의 개형이 두 탑 사이에서 약간의 차이를 보여주고 있다.⁽⁶⁾

이러한 파과의 차이는 같은 부피를 같은 흡착탑으로 dual bed를 설계하였어도, 각 흡착탑이 열교환 효과 정도에 따라 다른 흡착 동특성을 나타내기 때문이다.

Inner bed의 10cm, 90cm 부분과 outer bed의 10cm, 30cm, 50cm, 75cm부분에 RTD를 설치하여 온도를 측정하였

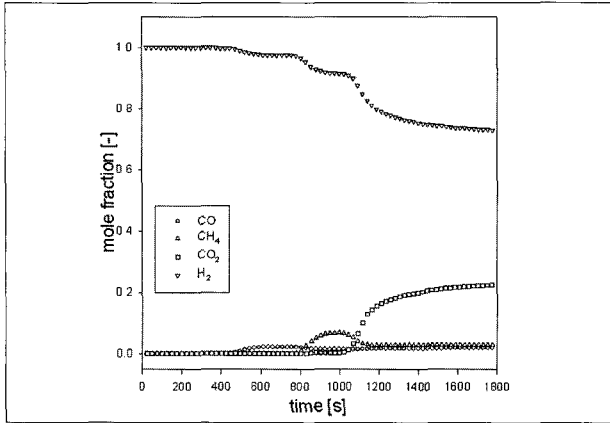


Fig.4 Breakthrough curves of inner bed under 9 atm and 7 LPM

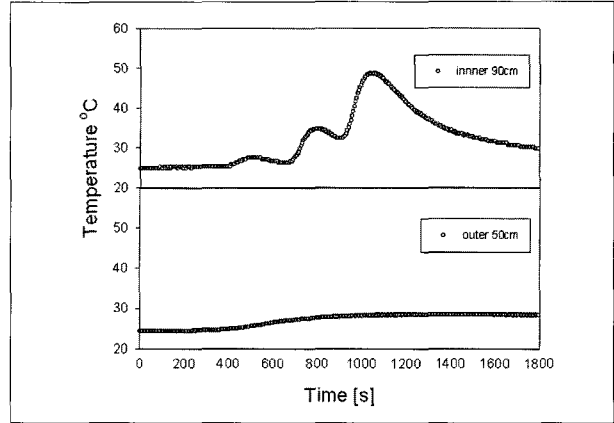


Fig.6 Temperature history from feed inlet at 9 atm and 7 LPM in inner bed

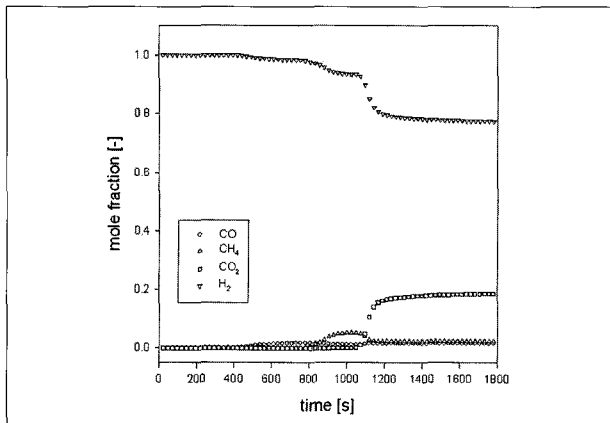


Fig.5 Breakthrough curves of outer bed under 9 atm and 7 LPM

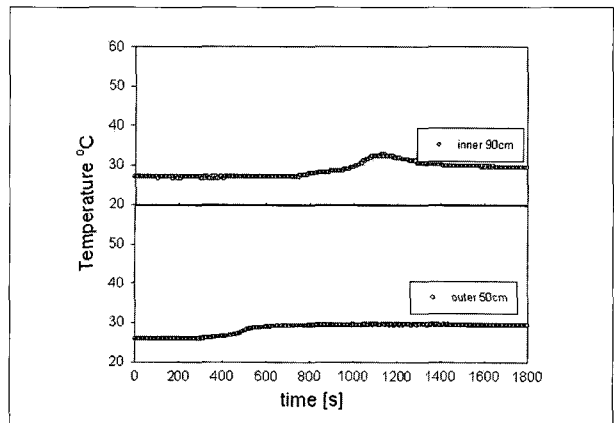


Fig.7 Temperature history from feed inlet at 9 atm and 7 LPM in outer bed

다. Fig.6과 7을 보면 inner bed나 outer bed에서 파과가 일어날 때 각각 다른 탑에서도 온도가 상승되는 것을 볼 수 있다. Fig.6에서 보면 inner bed에서 흡착을 하는 경우 inner bed의 온도는 크게 상승을 하기는 하지만 outer bed의 온도 상승이 있는 것으로 보아 각 흡착탑 사이에 열교환이 있는 것을 알 수 있다. 또한 각 성분의 MTZ(mass transfer zone)가 분리되어 온도의 excursion을 나타내고 있다. 그러나 inner bed 안에서는 열교환을 할 수 있는 부분이 outer bed로 한정되어 있기 때문에 outer bed에 비해 효과적인 열교환이 일어나지는 않았다. 따라서 이러한 영향이 CO₂의 tailing에 반영되고 있다. 반면 outer bed 파과의 경우 Fig.7에서 볼 수 있듯이 온도의 상승이 inner bed에서의 흡착에 비해 적은 것을 알 수 있다.

Outer bed 파과의 경우에는 탑의 중앙이 비어져있는 상태가 되기 때문에 탑의 안쪽과 바깥쪽에서 이중으로 열교환이 일어나기 때문에 보다 효과적인 열교환 효과를 보인다. 따라서그림에서 볼 수 있듯이 흡착동안 탑에서의 온도 상승이 매우 적으며, CO₂의 파과곡선은 보다 급격한 형태를 보이고 있다.

이러한 inner bed와 outer bed의 열교환에 따른 온도 상승 관계는 흡착탑의 파과 곡선에 영향을 주고 있다. 비록 outer bed에서 파과는 inner bed와의 열교환 효과로 인하여 온도의 상승이 미세하게 일어나지만, inner bed에서 파과실험을 할 때에는 흡착이 일어나는 inner bed안에서 온도의 상승이 큰 편이다. 이러한 온도의 영향에 인하여 outer bed와 inner bed에서 각 성분의 파과 곡선의 차이로 나타나며, 설계된 흡착탑

이 열교환 기능을 가진 것을 알 수 있다.

3.2 압력에 의한 영향

Fig.8 과 9은 7 LPM의 일정 유속 조건에서 흡착압력의 변화에 따른 4성분계의 파과개형을 도시한 것으로서, 압력이 높을수록 흡착제 흡착용량이 증가하여 파과시간이 길어짐을 보여주고 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 흡착압력의 선형 증가에 따른 파과시간의 증가폭이 줄어들고 있으며, 이러한 결과는 한계흡착량에 접근하고 있음을 의미한다.⁽⁶⁾

7LPM, 9atm의 조건에서 inner bed와 outer bed의 파과실험을 도시한 Fig.3과 4와 마찬가지로 적용된 압력에 관계없이 수소의 순도는 먼저 CO에 의해 먼저 떨어지게 되고 그 이후로 CH₄에 의해 천천히 떨어지게 되고 마지막으로 CO₂의 영향으로 급속하게 변화가 일어난다. 그리고 수소의 순도를 보면 outer bed에 비해 inner bed에서는 tailing 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 앞서서도 언급했듯이 두 탑 사이의 열교환 효과에 기인한 것으로 outer bed의 경우 파과실험 중에 효과적인 열교환 효과로 온도의 상승이 5℃ 정도 인데 비하여 inner bed는 온도가 35℃ 가량 상승하기 때문에 일어나는

것으로 해석할 수 있다.

또한, 가장 먼저 파과가 일어나는 CO에 의해 수소의 순도에 변화가 있을 때에도 outer bed의 경우 roll-up 현상이 적게 나타나서 수소 순도의 변화가 적음을 볼 수 있다. 반면에 inner bed의 경우 세 가지 압력 조건에서 모두 CO의 파과에 따른 수소 순도의 변화를 확실하게 확인 할 수 있고, 이것으로 roll-up 현상이 outer bed에 비해 크게 일어남을 알 수 있다.

압력의 변화에 따른 inner bed의 파과 곡선과 outer bed의 파과 곡선의 차이를 보면 압력이 증가함에 따라 outer bed의 경우 inner bed 보다 압력 증가와 함께 파과 시간이 크게 증가함을 볼 수 있다. 반면에 inner bed의 경우 압력이 증가하더라도 파과시간의 차이는 크게 나타나지 않는다. 흡착이 일어나는 과정에서 inner bed는 outer bed에 비해서 높은 온도를 유지하고 있고, 온도가 높아지면 그에 따라 흡착량이 줄어든다. 따라서 inner bed에서는 압력이 높아지더라도 한계흡착량의 증가는 높은 온도에 의해 크게 증가하지 못하는 것으로 해석할 수 있다. 반면에 outer bed는 흡착이 일어나는 과정에서 상대적으로 온도의 상승이 적게 일어나기 때문에 압력의 변화에 따른 파과시간의 변화가 뚜렷하게 확인된다. 따라서 outer bed의 성능이 적용 조건에 상관없이 inner bed보다 우수할 것으로 예상할 수 있다.

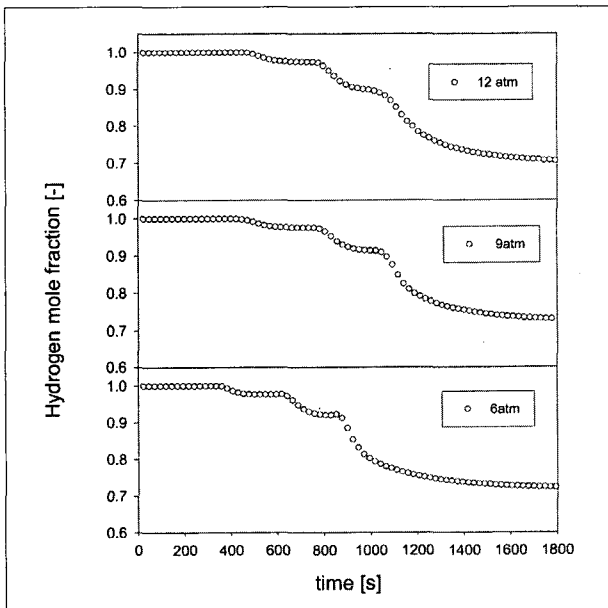


Fig.8 Effect of adsorption pressure on breakthrough curves at 7LPM in inner bed

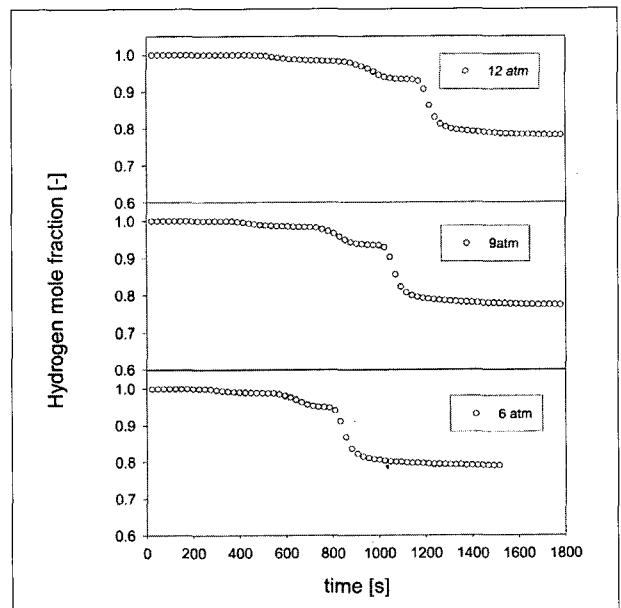


Fig.9 Effect of adsorption pressure on breakthrough curves at 7LPM in outer bed

3.3 탈착 실험

Dual bed 에서의 탈착 실험을 위해 흡착 실험이 끝난 흡착탑에 순수한 수소 기체를 7 LPM, 1 atm 의 조건으로 흘려주었다. 탈착 실험에 따른 조성은 Fig.10 에 나타내었고 Fig.11 과 12에 온도 변화를 보였다.

탈착 실험에서 Fig.9에 볼 수 있듯이 CO와 CH₄는 탈착이 시작되면서 200초 이내에 모두 탈착이 일어나는 것을 알 수 있으나, CO₂의 경우는 1800초가 돼서야 순도가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 CO₂가 활성탄에 대하여 강흡착질로 작용하기 탈착이 천천히 일어나며, PSA 공정에 있어서 CO₂의 효과적인 탈착이 PSA의 효율에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 수소분리 PSA 공정에 있어 수소 생산시에는 CO 농도의 변화를 조절하여야 하며, 탑의 재생기에는 CO₂ 농도 변화에 대한 공정 변수를 결정하여야 한다.

Fig.11 과 12에 각각 inner bed에서 탈착 실험을 할 때와 outer bed에서 탈착 실험을 할 때의 온도변화를 나타냈다. 탈착은 발열 반응이므로 탑내 온도의 감소를 볼 수 있다.

Dual bed의 파과 실험과 마찬가지로 inner bed의 탈착에서의 온도 변화는 outer bed 탈착 실험의 온도 변화보다 크게 일어났다. 이러한 현상은 파과 실험에서의 온도 변화와 마찬가지로 열교환 효과의 차이로 설명할 수 있다.

특히 각각 inner bed와 outer bed에서만 탈착 실험을 했음

에도 불구하고 열전달로 인하여 다른 탑의 온도까지 변화가 일어났다. PSA 공정은 한 탑에서 흡착이 일어날 때 다른 탑에서는 탈착이 일어나게 된다. Dual bed를 PSA 공정에 도입하면 한 쪽 탑에서 흡착이 일어 날 때 다른 탑에서는 탈착이 일어나게 되고, 한 탑의 탈착에 의한 온도의 하락과 다른 탑의 흡착에 의한 온도 상승은 열전달로 인하여 양쪽 탑의 성능 향상에 기여할 것이다. 이는 흡착의 특성상 온도가 낮을수록 흡착량이 커지고, 온도가 높을수록 탈착 효율이 좋기 때문에 본 연구에

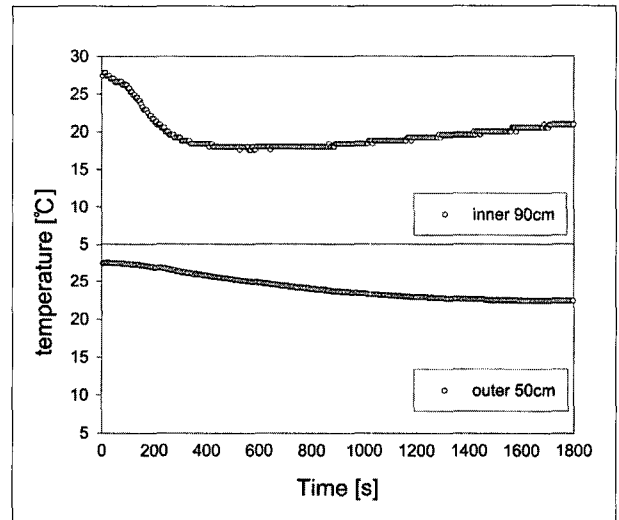


Fig.11 Temperature history from purge inlet at 1 atm and 7 LPM in inner bed

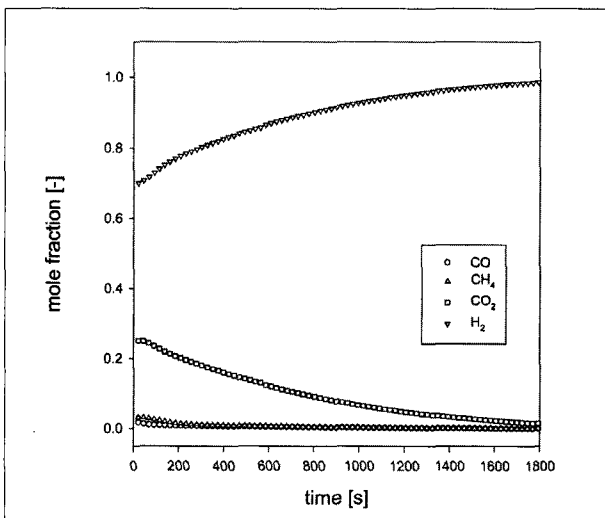


Fig.10 Desorption curves of inner bed under 1 atm and 7 LPM

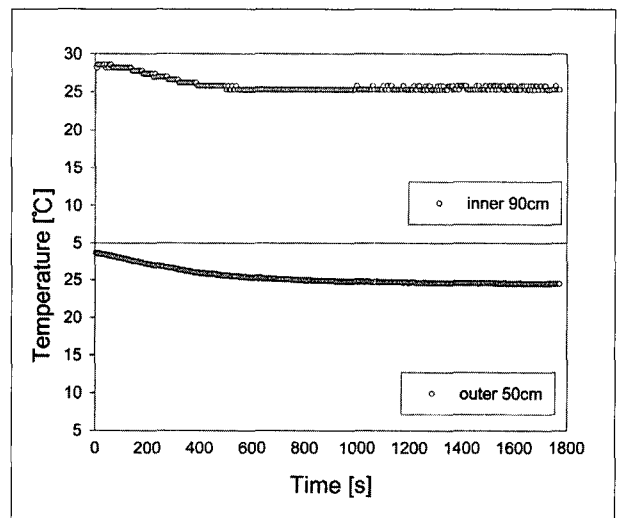


Fig.12 Temperature history from purge inlet at 1 atm and 7 LPM in outer bed

서 개발한 dual bed의 열교환 효과는 적은 부지를 차지하는 장점과 더불어 PSA의 성능을 높일 수 있게 된다.

3.3 단일탑과 Dual bed 성능 비교

단일탑과 dual bed의 성능을 비교하기 위하여 같은 조건에서 단일탑과 dual bed에서 파과 실험을 실시하였으며, 이를 Fig.13 에 나타냈다.

단일탑은 직경 3.5cm, 길이 100cm 의 탑을 사용하였다. Dual bed의 내부 부피는 단일탑의 내부 부피의 81%이다. Fig.12 에 단일탑과 inner bed, outer bed의 파과 개형을 보면, dual bed는 기존의 단일 탑에 비하여 81%의 용량밖에 갖고 있지 않으나 파과시간은 오히려 길게 나오는 것을 알 수 있다. Outer bed의 경우 앞의 파과 실험에서도 예측 할 수 있었듯이 온도의 상승이 적기 때문에 흡착탑의 효율이 더 좋게 나타난다. 그러나 Outer bed 뿐만 아니라 inner bed 에서도 단일탑에 비하여 효율이 좋게 나타남을 볼 수 있으며, 이는 상대적으로 적은 열전달 효과를 가지고 있더라도 공정의 효율 향상에 기여할 수 있음을 나타낸다. 이로써 개발된 dual bed는 단일탑에 비하여 부지적인면 뿐만 아니라, 공정상의 높은 효율을 나타내고 있음을 확인 할 수 있다.

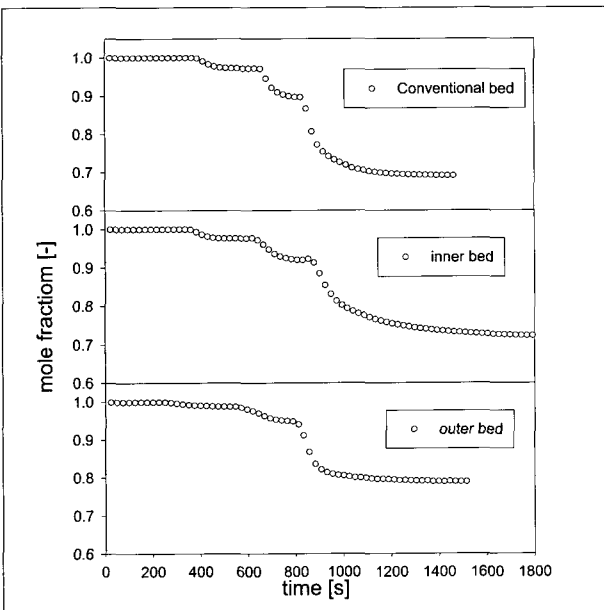


Fig.13 Breakthrough curves of different beds under 6 atm and 7 LPM

3.4 PSA 공정 실험

공급 유속 7 LPM, 흡착 압력 6 atm, 정화 유속 0.81 LPM 으로 dual bed에서 PSA 공정 실험을 실시하였다.

흡착 단계의 step time 을 양쪽 탑 모두 180초로 설정하여 실험을 하였고, 그 때의 온도를 Fig.14 에 나타내었다. 이 조건의 경우 outer bed에서의 생성물은 99.8 % 이상의 순도를 보였지만 inner bed의 생성물은 99.0% 까지 순도가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 온도 그림에서 볼 수 있듯이 inner bed의 경우 정상상태로 가더라도 온도의 변화가 크게 나타나는데 비해서 outer bed는 온도의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 inner bed의 90cm 지점의 온도를 보면 온도가 정상상태로 가지 않고 점점 상승하는 것을 볼 수 있는데 이것은 물질전달대가 PSA 공정을 하면서 탑의 뒤쪽으로 이동하는 것을 나타내는 것이고, 이 때문에 inner bed의 경우 순도가 떨어지게 된다. 따라서 다른 공정 성능을 보이는 탑을 동시에 사용하는 경우가 되기 때문에 이에 대한 공정 운전 조건을 찾을 필요성이 있다.

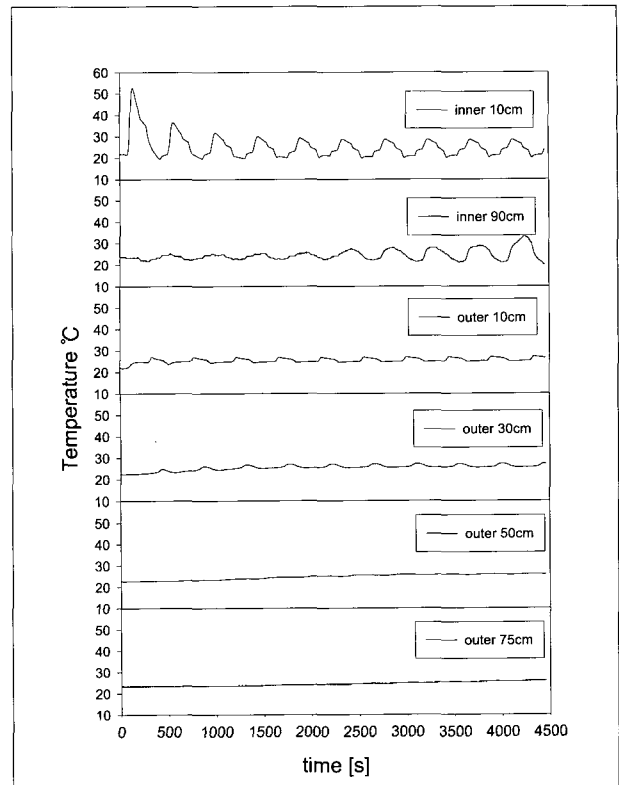


Fig.14 Temperature profile during PSA process at AD step time 180s

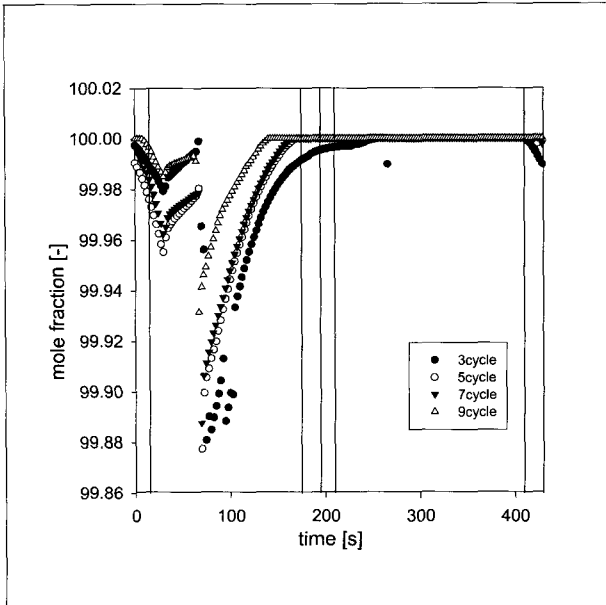


Fig.15 Concentration during PSA process at AD step time 160/200s

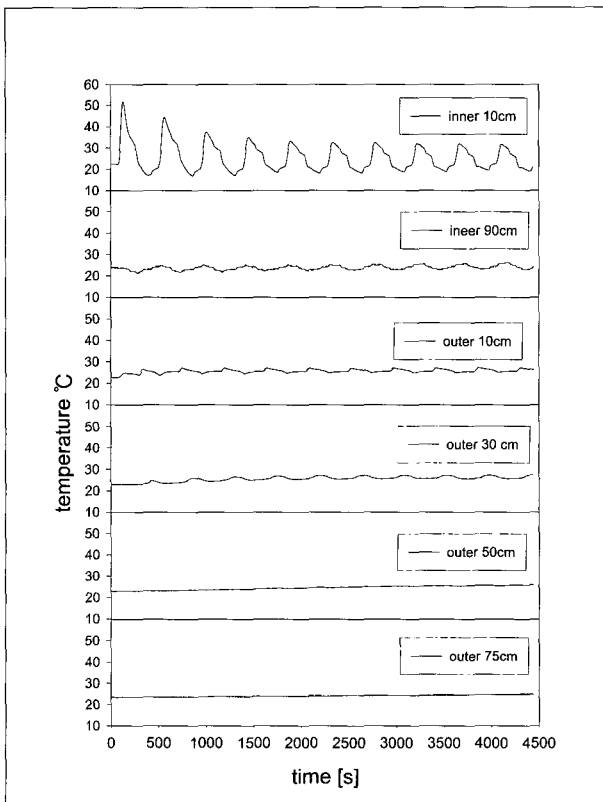


Fig.16 Temperature profile during PSA process at AD step time 160/200s

Dual bed의 PSA 공정에서 inner bed와 outer bed의 효율이 다르다는 점을 해결하기 위하여 흡착시간을 달리하여 PSA 공정 운전하였다. Inner bed의 흡착 단계 step time은 160초, outer bed의 경우 200초로 조정하여 실험을 하였고 그 결과를 Fig.15와 16에 나타내었다. 흡착 시간을 같게 한 실험에서 inner bed에서 나온 생산물의 순도가 낮기 때문에 흡착 시간을 줄이는 한편 outer bed의 경우 온도 그래프에서 물질전달 대가 충분히 이동하지 못하였으므로 흡착 시간을 늘린 것이며, 운전의 대칭성을 위하여 inner bed의 정화 시간을 늘려 주었다. Fig.15의 농도 그래프를 보면 cycle이 증가하면서 수소의 순도가 높아지게 나온다. Outer bed에서 나온 생성물의 순도는 99.99% 이상의 순도로 나오는 반면 inner bed에서 나온 생성물의 순도는 99.90% 까지 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 탑의 압력 강하에 의한 것으로 압력 강하를 극복하기 위한 탑의 설계가 필요하다. 그러나 Fig.16에서 온도의 그래프를 보면 180초로 같은 흡착 단계 step time 을 적용한 실험과는 달리 탑들의 온도 profile이 정상상태로 가는 것을 볼 수 있으며, 이는 일정한 순도를 생산할 수 있음을 나타낸다.

4. 결론

Compact 형 수소 PSA를 설계하기 위하여 dual bed를 설계하였다. Dual bed는 흡착탑의 부피를 크게 줄일 뿐만 아니라 흡착탑 간의 열교환을 효과적으로 할 수 있게 한다. PSA 공정에서 온도가 높아지면 흡착제의 흡착능이 떨어질 뿐 아니라 순도와 회수율에도 영향을 미치게 된다. 또한 낮은 온도는 탑의 재생 효율을 나쁘게하여 공정 성능을 저하시킨다. 따라서 이러한 문제점을 개선하는데 활용될 수 있다.

실험을 통해서 dual bed에서는 각각의 탑 사이에서 열교환이 일어남을 확인 하였고, 특히 outer bed의 파과 실험에서는 그 열교환 효과가 더 크게 나타났다. 그 결과 outer bed에서는 CO₂의 tailing이 적게 일어남을 알 수 있으며, 고순도 수소를 생산하는데 보다 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

PSA 공정에 적용할 경우 outer bed의 온도 변화가 적어서 inner bed보다 보다 좋은 효율을 나타낼 수 있다. 그러므로 outer bed의 경우 inner bed보다 긴 흡착시간을 적용함으로써 생산성을 높일 수가 있고, inner bed는 재생시간이 길어지면