

## 의료용 산소발생기 제작을 위한 PSA 공정의 개발

최재욱, 나병기<sup>†\*</sup>

한국과학기술연구원 에너지환경연구본부  
136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

<sup>†</sup>충북대학교 화학공학부  
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410

(2009년 4월 2일 접수; 2009년 5월 28일 수정본 접수; 2009년 6월 4일 채택)

### Development of PSA Process for Medical Oxygen Generator

Jae-Wook Choi and Byung-Ki Na<sup>†\*</sup>

Energy and Environment Research Division, KIST  
39-1 Hawolgok-dong Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

<sup>†</sup>Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University  
410 Sungbong-ro, Heungduk-gu, Chungbuk 361-763, Korea

(Received for review April 2, 2009; Revision received May 28, 2009; Accepted June 4, 2009)

#### 요 약

공기 중에서 산소를 분리하기 위하여 2탑 PSA 공정을 이용한 4단계 기본공정 공급기체의 유량과 세정기체의 유량이 생성물의 순도와 유량에 미치는 영향을 살펴보았다. 4단계 기본 공정에 생성물가압 단계를 도입하면 생성물의 순도와 유량을 증가시키고, 압력균등화단계를 도입한 경우에는 생성물의 유량이 크게 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 현재 상용화되어 있는 의료용 산소 발생기 사양인 5 ℓ/min 유량에서 순도 90%의 산소를 얻기 위해 시제품을 제작하여 산소의 순도 및 유량에 관한 실험을 수행하였다.

주제어 : PSA, 흡착법, 산소발생기, 의료용

**Abstract :** In order to separate oxygen from air, the effects of feed gas flow rate and rinse gas flow rate on the product purity and flow were examined using 2 bed PSA with 4 step cycle. The addition of product pressurization step increased the product purity and flow rate. The addition of pressure equalization increased the product flow rate. The test product was manufactured and the purity and flow rate of product oxygen was examined. The results were compared with the commercial medical oxygen generator of 5 ℓ/min and 90% oxygen purity.

**Key words :** PSA, Adsorption, Oxygen generator, Medical use

#### 1. 서 론

기체혼합물을 분리하는 공정 중에서 각 성분의 흡착특성을 이용하여 물질을 분리하는 흡착공정은 1970년대 이후 환경오염 인자를 배출하지 않는 환경친화적인 공정으로서 그리고 에

너지 집약적인 산업으로서 주목을 받고 있으며, 특히 일반적인 분리 공정의 적용이 어려운 경우에 대안으로 제시되어 왔다. 기상의 흡착질이 선택적으로 흡착되는 흡착특성과 압력에 따라 흡착되는 흡착질의 양이 변하는 물리적 특성을 이용하여 기체를 분리하는 PSA (Pressure Swing Adsorption) 공정은

\* To whom correspondence should be addressed.  
E-mail : nabk@chungbuk.ac.kr

Skarstrom에 의해 제시된 최초 공정 이후 여러 방면에 이용되어지고 있다[1].

현재 기체의 분리 및 정제 공정으로서 상용화되어 있는 PSA 공정으로는 공기의 건조공정, 수소의 정제 및 회수공정, CH<sub>4</sub>의 회수공정, 배가스로부터 CO<sub>2</sub>의 회수공정[2], 혼합가스로부터 미량 성분의 제거공정[3], 그리고 공기로부터 산소와 질소의 분리 및 농축공정 등이 있으며[4], 현재에도 PSA 공정의 적용성 확대와 공정 개선을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다[5]. 본 연구의 연구대상인 공기로부터 산소를 분리, 농축하는 공정은 생물학적 폐수처리공정, 펄프의 표백공정, 생물학적 반응기 등에 이용되고 있다. 그리고 현재 날로 심각해지는 대기오염으로 인해 호흡기 계통의 질환이 증가되자 의료용 산소발생기에 대한 관심이 높아지고 있다. PSA 공정을 이용한 공기로부터 산소의 농축은 여러 잠재적 응용 분야가 있으므로 앞으로도 계속 발전될 것으로 기대된다.

PSA는 흡착을 이용한 기체분리공정이다. 따라서 PSA의 원리를 이해하기 위해서는 흡착제로 충전된 흡착탑 내의 기체의 흡착 성질과 거동을 알 필요가 있다. 일반적으로 기체의 흡착은 높은 압력과 낮은 온도에서 잘 이루어지며, 압력이 낮아수록 흡착이 잘 이루어지지 않는다. 온도가 높은 경우에는 탈착이 잘 이루어지며 흡착이 일어나기 힘들다[6]. 이것이 바로 PSA와 TSA (Temperature Swing Adsorption)의 기본 원리이다. 즉, 처음 단계에서는 압력을 높여 주거나 온도를 낮추어 흡착이 활발하게 이루어지게 하고 다음 단계에서 압력을 낮추거나 온도를 높여 주어 탈착이 잘 이루어지도록 하여 준다. 이때 흡착과 탈착시의 절대 흡착량의 차이만큼 우리가 원하는 생산물을 얻을 수 있으며 압력 혹은 온도의 차에 의해 흡착량이 달라진다[7]. 흡착을 이용하여 기체 분리가 가능한 이유는 흡착제의 각 기체에 대한 선택도의 차이 때문이다. 보통 흡착제에 대한 각 기체들의 선택도는 평형흡착량의 차이와 흡착속도의 차이에 따라서 결정이 된다[8].

본 연구에서는 공기로부터 산소를 농축하는 2탑 PSA 공정의 기초 연구를 통하여 산소 농축공정 개발을 위한 기초 자료와 제반 기술을 확립하고 공정을 최적화하여 의료용 산소발생기를 개발하고자 하였다.

## 2. 실험

PSA 공정실험에 사용된 실험장치는 2개의 흡착탑과 생성물탱크로 구성되어 있으며 개략적인 장치도 및 사진을 Figure 1에 나타내었다. 흡착탑은 스테인레스스틸로 제작되었으며 내경 50 mm, 높이가 500 mm이다. 원료 기체의 공급과 배출을 조절하기 위한 2개의 체크밸브와 7개의 솔레노이드밸브, 흡착탑 내의 압력을 유지시켜 주기 위한 배압조정기, 흡착탑과 생성물탱크의 압력 변화를 관찰하기 위한 압력변환기, 세정 유량과 생산물의 유량을 조절하기 위하여 미터링밸브를 각각 설치하였다. 그리고 공기 중의 수분은 제올라이트의 활성을 감소시키는 원인이므로 공기 중에 포함되어 있는 수분을 제거하기 위하여 알루미늄으로 충전된 탑을 원료 공급라인에 설치하였다. 생성물탱

크에서 배출되는 산소의 순도는 mass spectrometer (Balzers, QMS 200)를 이용하여 온라인으로 측정하였다. 흡착제는 제올라이트 5A를 사용하였으며, 입자의 크기는 8/12 mesh이며, 밀도는 0.5 g/cm<sup>2</sup> 이었다.

항상 실험을 하기 전에 제올라이트에 흡착되어 있는 수분을 제거하기 위해서 350℃에서 4시간 동안 전처리를 하였다. 열처리를 하면서 아르곤이나 헬륨과 같은 불활성 기체를 흡착탑에 흘려주어 수분의 탈착 및 제거가 원활히 이루어지도록 하였다. 열처리가 끝나면 흡착탑에 공기를 흘려보내면서 흡착탑의 온도가 상온으로 떨어질 때까지 방치하였다.

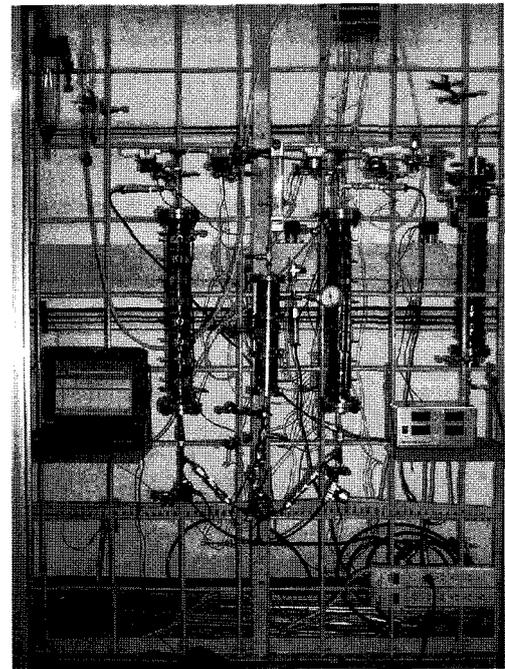
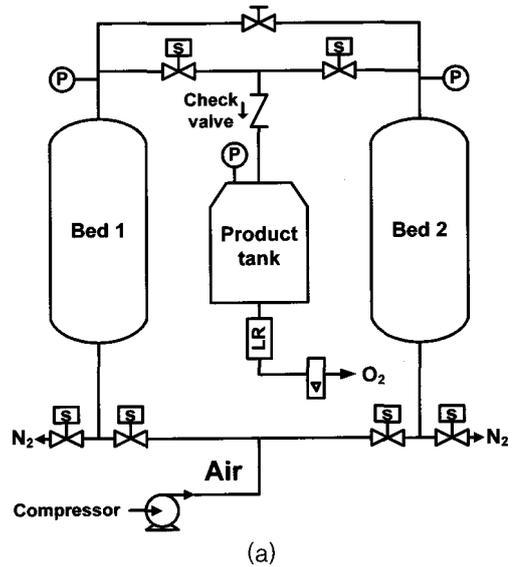


Figure 1. PSA air separation unit for basic experiments: (a) schematic diagram and (b) picture of the system.

Skarstrom cycle					
Bed 1	PZ	FD	BD	PU	
Bed 2	BD	PU	PZ	FD	
Product pressurization process					
Bed 1	PZ	FD	BD	PU	PP
Bed 2	BD	PU	PP	PZ	FD
Pressure equalization process					
Bed 1	PZ	FD	PE	BD	PU
Bed 2	BD	PU	PE	PZ	FD

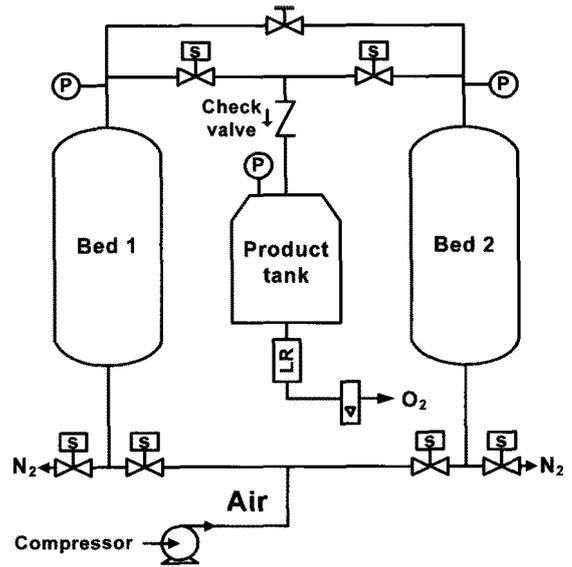
PZ: Pressurization, FD: Feed, BD: Blowdown, PU: Purge  
 PP: Product pressurization, PE: Pressure equalization

Figure 2. Time schedule and sequence of PSA process.

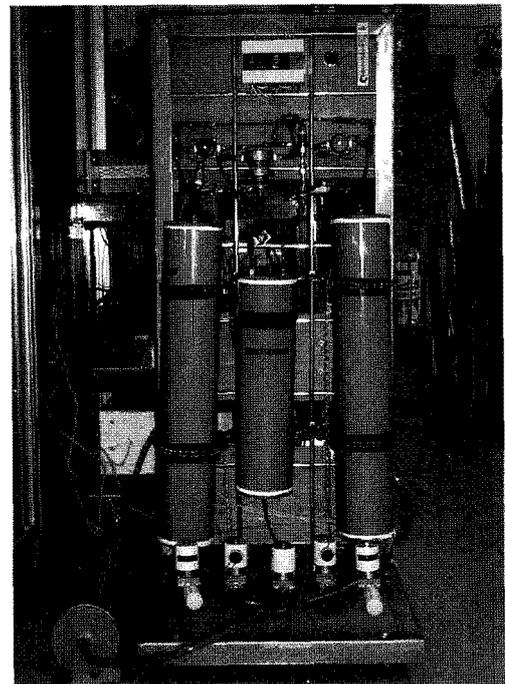
본 연구에서는 먼저 PSA의 기본 공정인 가압, 흡착, 탈착, 세정의 4단계 공정을 이용하여 공급기체의 유량과 세정기체의 유량이 PSA 공정에 미치는 영향을 살펴보았다. 미터링밸브를 사용하여 흡착압력에서의 공급기체의 유량을 9.5~22 l로 변화시켰으며, 세정기체의 유량도 미터링밸브를 사용하여 2.5~3.9 l로 조절하여 실험하였다. 그리고 PSA 공정의 기본 4단계에 생성물가압 (product pressurization), 압력균등화 (pressure equalization) 단계가 추가된 5단계 공정에서는 각 단계의 사이클시간을 조절하여 각 단계가 공정의 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 흡착압력은 배압조정기를 사용하여 4.5기압으로 유지하였으며, 세정 및 탈착단계는 대기압 하에서 실시되었다. 각 공정의 세부 단계와 순서는 Figure 2에 나타내었다.

시작품에 사용된 실험장치의 개략도 및 사진은 Figure 3에 나타내었다. 흡착탑은 PVC로 제작되었으며 내경 100 mm, 길이가 600 mm이다. 시작품에서는 앞에서의 2탑 PSA 공정의 실험결과를 토대로 하여 공정의 구성 및 배치를 개선하였다. 2탑 PSA 장치와 달리 기체의 공급과 배출을 조절하기 위해 1개의 check 밸브와 6개의 솔레노이드 밸브를 사용하였으며, 생산물을 균일하게 얻기 위해 배압조정기 대신 압력조정기를 사용하였으며, 생산물의 유량은 유량계를 사용하여 조절하였다. 원료 공기의 공급은 압축공기 대신 압축기를 사용하여 공급하였으며, 압축기에서 배출되는 공기의 온도를 낮추기 위한 열교환기 및 수분과 먼지를 제거하기 위한 공기필터를 압축기의 출구 부분에 설치하였다. 흡착제는 제올라이트 5A (8/12 mesh)와 제올라이트 13X (20 mesh)가 사용하였으며, 흡착탑을 수분으로부터 보호하기 위해 흡착탑의 하단에 알루미늄을 채웠다.

현재 상용화되어 있는 의료용 산소발생기는 산소 유량 5 l/min, 순도 90%로 디자인되어 있다. 따라서 본 연구에서는 산소 유량 5 l/min에서 순도 90%이상을 얻는 것을 목표로 하여 4단계 Skarstrom cycle과 여기에 압력균등화단계를 추가한 5단계 공정에서 생산물의 유량을 1~5 l로 변화시켜 가면서 실험하였다.



(a)



(b)

Figure 3. A trial product of the oxygen generator: (a) schematic diagram and (b) picture of the system.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1. 공급기체 유량의 영향

우선 2탑 4단계 공정에 관한 실험을 수행하였다. 공급기체 유량이 PSA 공정 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 미터링밸브를 이용하여 공급기체의 유량을 9.5, 14, 22 l/min으로 조절하면서 각각의 공급기체 유량에서 생산된 산소의 순

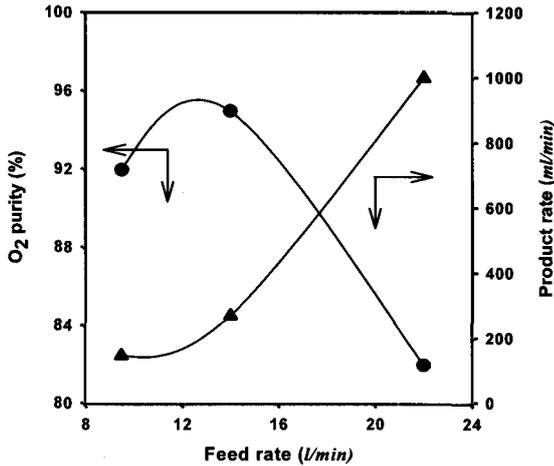


Figure 4. Effect of feed rate on O<sub>2</sub> purity and product rate.

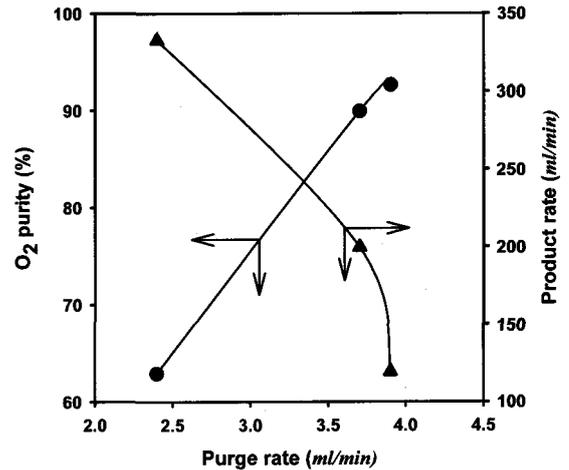


Figure 5. Effect of purge rate on O<sub>2</sub> purity and product rate.

도와 유량을 살펴보았다. 공정의 사이클시간은 가압단계 50초, 흡착단계 20초, 탈착단계 50초, 세정단계 20초이다. 실험 결과는 Figure 4에 나타내었다.

공급유량이 14 l/min인 경우에는 산소의 순도가 95%로 증가하였지만, 공급유량이 22 l/min인 경우에는 오히려 순도가 82%로 감소되었다. 이러한 결과를 토대로 살펴보면 공급유량 9.5 l/min과 22 l/min 사이에 산소의 순도가 최대가 되는 유량이 존재하는 것을 알 수 있다. 공급유량이 9.5 /min인 경우에는 아직까지 흡착탑이 완전히 파괴되지 않았다고 볼 수 있으며, 22 l/min인 경우에는 흡착탑이 이미 파괴되어 공기 중의 질소가 제올라이트에 더 이상 흡착되지 못하고 생성물인 산소와 같이 배출되므로 산소의 순도가 떨어진 것이다. 따라서 실제 조업 시에는 공급기체의 유량을 조절하거나 흡착단계 시간을 조절하여 흡착탑이 완전히 파괴되지 않도록 하여야 할 것이다.

생성된 산소의 유량은 공급기체 유량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 공급기체 유량이 증가할수록 흡착탑 출구로 배출되는 양이 증가하기 때문이다.

### 3.2. 세정기체 유량의 영향

2탑 4단계 공정에서 세정기체 유량이 PSA 공정의 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 공급기체의 유량을 14 l/min으로 고정시키고, 생성물탱크에서 흡착탑으로 유입되는 기체의 흐름을 미터링밸브로 조절하여 산소의 순도와 유량을 살펴보았다. 이 실험에서 사용된 공정의 사이클시간은 가압단계 50초, 흡착단계 20초, 탈착단계 50초, 세정단계 20초이다. 실험결과는 Figure 5에 나타내었다.

세정기체의 유량이 증가하면 산소의 순도는 증가하지만 유량은 감소한다. 세정 기체의 유량이 증가함에 따라 산소의 순도가 증가하는 것은 고순도의 산소가 감압단계가 끝난 저압의 탑에 유입됨으로 인해 감압단계에서 탈착된 질소를 탑 출구로 배출시키고 아직 탈착되지 않은 질소가 탈착되어 산소로 치환

되므로 흡착탑의 재생이 훨씬 더 잘 일어나기 때문이다. 그리고 세정기체의 유량이 증가함에 따라 산소의 유량이 감소하는 것은 생산물로 얻어진 고순도의 산소를 이용하여 저압의 탑에 유입시켜 배출하므로 생산물로 얻어야 할 산소의 손실이 일어나기 때문이다.

### 3.3. 생성물가압단계의 영향

생성물가압단계를 추가하여 2탑 5단계 공정의 실험을 수행하였다. 생성물가압단계가 PSA 공정 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 가압단계와 세정단계의 시간은 25초와 15초로 각각 고정시키고 생성물가압단계 시간을 5, 10, 15초로 변화시키면서 실험하였다. Figure 6을 보면 생성물가압단계 시간이 길어짐에 따라 생산되는 산소의 유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 흡착단계에서 생산된 고순도의 산소가 세정단계가 끝난 저압의 흡착탑에 유입되어 회수되기 때문이다.

생성물가압단계의 시간에 따른 산소의 순도 변화를 살펴보

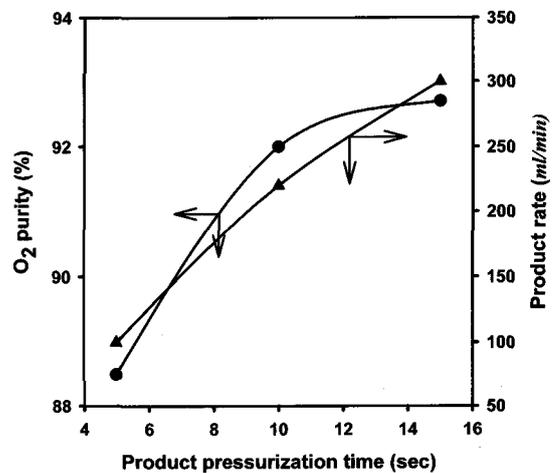


Figure 6. Effect of product pressurization step on O<sub>2</sub> purity and product rate.

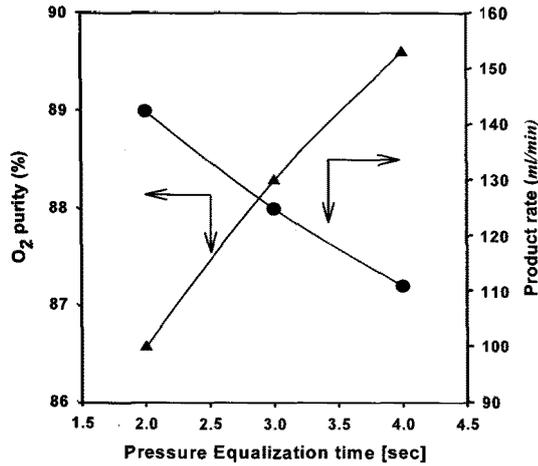


Figure 7. Effect of product equalization step on O<sub>2</sub> purity and product rate.

면, 역시 생성물가압단계의 시간이 증가함에 따라 산소의 순도도 역시 증가하였다. 이것은 앞에서 설명하였듯이 고순도의 산소가 저압의 흡착탑에 유입되어 농축되기 때문이다.

### 3.4. 압력균등화단계의 영향

먼저 압력균등화단계가 첨가된 2탑 5단계 공정에서 PSA 공정의 가압단계 시간을 결정하기 위해 압력균등화단계 시간을 2, 3, 4초로 각각 변화시켜 가면서 흡착압력에 도달하는 시간을 측정하였다. 압력균등화단계 시간이 2초인 경우에 가압단계 시간은 33초, 3초인 경우에는 32초, 4초인 경우에는 34초이었으며 세정단계 시간은 20초로 동일하게 하였다. 압력균등화는 생산물이 배출되는 방향으로 실시하였다.

Figure 7에 실험결과를 나타내었으며, 압력균등화 정도에 따라 생산물의 유량이 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 흡착단계가 끝난 고압의 흡착탑 상부에 존재하는 고순도의 산소가 압력균등화단계를 통해 세정단계가 끝난 저압의 흡착탑으로 유입되어 회수되기 때문이다.

압력균등화단계가 산소의 순도에 미치는 영향을 살펴보면, 그림에서 알 수 있듯이 압력균등화단계 시간이 증가될수록 산소의 순도는 감소한다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 압력균등화단계가 너무 길어 고압의 흡착탑에서 흡착되어 있던 강흡착질이 탈착되어 저압의 흡착탑으로 유입되기 때문이다.

### 3.5. 시작품 산소발생기의 제작

현재 상용화되어 있는 의료용 산소발생기는 산소유량 5 l/min, 순도 90%로 디자인되어 있다. 따라서 본 연구에서는 기본 공정과 여기에 압력균등화단계를 추가한 두 가지 공정에 대해 생산물의 유량을 1~5 l로 변화시켜 가면서 실험하였다.

Figure 8에서는 제올라이트 5A를 흡착제로 사용하였을 때 두 공정의 성능을 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 5 l/min의 유량에서 압력균등화단계가 추가된 공정이 4단계 공정보다 산소 순도가 20% 정도 더 높았다.

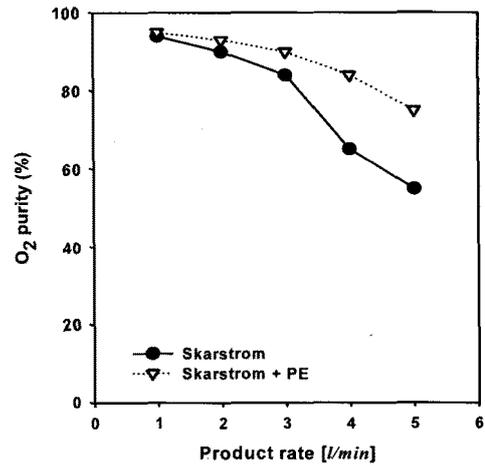


Figure 8. Effect of product rate on O<sub>2</sub> purity and product rate with zeolite 5A.

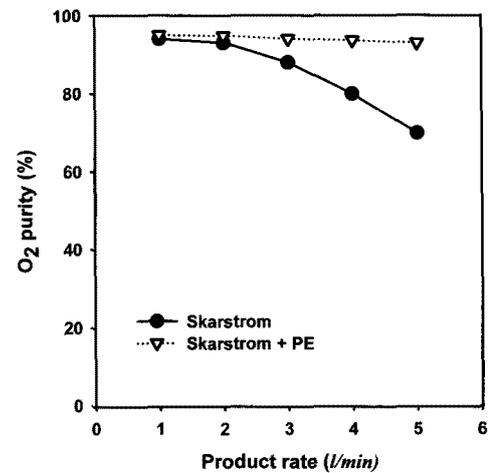


Figure 9. Effect of product rate on O<sub>2</sub> purity and product rate with zeolite 13X.

Figure 9에서는 제올라이트 13X를 흡착제로 사용하였을 때 두 공정의 성능을 비교하였다. 앞의 결과와 마찬가지로 압력균등화단계가 추가된 공정이 순도 면에서 훨씬 뛰어난 성능을 보였으며, 5 l/min 유량에서도 순도 90%이상의 산소를 얻을 수 있었다. 제올라이트 5A와 13X를 비교하면 5 l/min의 유량에서 13X가 높은 순도를 갖는 산소를 생성하는 것을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

2탑 PSA 공정을 이용한 산소 농축에서는 4단계 기본공정을 이용하여 공급기체의 유량과 세정기체의 유량이 생성물의 순도와 유량에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고 4단계 기본공정에 생성물가압 단계와 압력균등화단계를 첨가하여 각 공정이 생성물의 순도와 유량에 미치는 영향을 살펴보았다. 실험결

과에 의하면 세정기체의 유량이 증가함에 따라 순도는 증가하였고 생성물의 유량은 감소하였다. 공급기체의 유량을 증가시켰을 경우에는 순도는 감소하고 생성물의 유량은 증가하였다. 그리고 기본 공정에 생성물가압 단계를 도입하면 생성물의 순도와 유량이 증가하고, 압력균등화단계를 도입한 경우에는 생성물의 유량이 크게 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다.

위의 결과를 토대로 하여 시험용 산소발생기를 제작하였다. 현재 상용화되어 있는 의료용 산소발생기 사양인 5 l/min 유량에서 순도 90%의 산소를 얻기 위해 기본 공정과 여기에 압력균등화단계를 추가한 두 가지 공정에 대해 생산물의 유량을 1~5 l로 변화시켜 가면서 실험하였다. 두 공정을 비교해 보면 압력균등화단계가 첨가된 공정의 산소 순도가 20% 정도 더 높았으며, 유량 1 l/min에 순도 95%, 유량 5 l/min에 순도 92%의 산소를 얻을 수 있었다.

## 감 사

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Yang, R. T., "Gas Separation by Adsorption Processes," Butterworths, M.A., 1987.
2. Choi, W. K., Kwon, T. I., Yeo, Y. K., Lee, H., Song, H. K., and Na, B. K., "Optimal Operation of the Pressure Swing Adsorption (PSA) Process for CO<sub>2</sub> Recovery," *Korean J. Chem. Eng.*, **20**(4), 617-623 (2003).
3. Chue, K., Park, Y. K., and Jeon, J. K., "Development of Adsorption Buffer and Pressure Swing Adsorption (PSA) Unit for Gasoline Vapor Recovery," *Korean J. Chem. Eng.*, **21**(3), 676-679 (2004).
4. Lee, S. J., Ahn, H., Jee, J. G., Kim, M. B., Moon, J. H., Bae, Y. S., and Lee, C. H., "Comparison of PSA and VSA processes for Air Separation," *Clean Tech.*, **10**(2), 101-109 (2004).
5. Choi, J. W., Lee, H., Song, H. K., Suh, S. S., and Na, B. K., "Separation of Oxygen from Air using Rapid Pressure Swing Adsorption (RPSA) Process," *Clean Tech.*, **14**(1), 7-13 (2008).
6. Ruthven, D. M., "Principles of Adsorption & Adsorption Process," John Wiley & Sons, N.Y., 1984.
7. Wilson, R. T., and Danner, R. P., "Adsorption of Synthesis Gas Mixture Components on Activated Carbon," *J. Chem. Eng. Data*, **28**, 14-18 (1983).
8. Knaebel, K. S., and Hill, F. B., "Pressure Swing Adsorption : Development of an Equilibrium Theory for Gas Separations," *Chem. Eng. Sci.*, **40**(12), 2351-2360 (1985).

1. Yang, R. T., "Gas Separation by Adsorption Processes,"