

압력균등화가 포함된 PSA공정의 성능평가

서성정 · 김기열 · 서성섭
홍익대학교 공과대학 화학공학과

Evaluation of PSA Process including Pressure Equalization

Seong Jeong Seo · Giyeol Kim · Sung-Sup Suh
Department of Chemical Engineering, Hongik University

Abstract

The oxygen demand for everyday life and industry is increasing continuously. Especially, the use of low purity oxygen is in the limelight recently. However, the object of most commercialized PSA processes which separate oxygen from air have been focused to produce a high purity oxygen. This experiment was performed to obtain the optimal process conditions in producing oxygen from air using pressure swing adsorption including pressure equalization. The influences of pressure equalization step duration, pressurization step duration, and adsorption step duration were investigated. The optimum operating conditions were observed for given oxygen purity.

1. 서 론

환경오염에 대한 사회적인 관심은 쾌적한 환경에 대한 욕구로 이어지고 있다. 우리가 마시는 공기에 대한 관심의 초점도 단순히 오염되지 않은 깨끗한 공기가 아닌 보다 더 건강에 도움이 되는 공기 쪽으로 다가가고 있다. 이미 알려진 바와 같이 공기 중에 포함된 산소의 농도는 우리 몸의 건강에 직접적인 영향을 미치며 따라서 환경이 오염되고 질 높은 삶에 대한 기대가 커질수록 우리 생활 곳곳에 다양한 형태의 산소 수요가 예상된다. 산업적인 측면에서도 새로운 공정이나 재료 개발에 비해 상대적으로 주목받지 못하던 이미 개발된 공정의 성능이나 효율의 개선이 부각되고 있어 저순도 산소 수요가 새롭게 창출될 것으로 보인다. 이런 측면에서 봤을 때 PSA의 연구에 있어서도 이제는 무조건적인 고순도 산소 생산에 목표를 둘 것이 아니라 보다 경제적이고도 효율적인 운전 조건을 찾는 것이 우선되어야 한다. 무한한 원료인 공기로부터 산소를 생산하는 여러 방법 중 대표적인 것이 pressure swing adsorption(PSA)을 이용한 생산법이다. 1958년 Skarstrom에 의해 출원된 특허와 이와는 독립적으로 Gurein de Montgareuil 및 Domine의 다른 방식의 특허[1]에 발표된 이후 지난 수십 년간 조업조건 개선, 장치의 간소화, 새로운 흡착제의 개발 등 PSA에 관련된 많은 연구가 진행되어 다양한 PSA공정이 개발되어 상용화 되었다.[2] 상용화된 PSA 공정의 대부분은 polybed 시스템이며 보통의 경우 효율적인 산소생산을 위해 압력균등화 스텝이 포함되는 경우가 많다. 하지만 이 경우에도 고순도 산소 농축에 초점을 맞추고 있으며 저순도 산소의 경우 고순도 산소와 공기를 혼합하여 희석시켜 주는 전통적인 방법에 의존하는 경우가 많다. 가정이나 산업 현장에서의 산소 수요를 위해서는 비교적 저순도의 산소를 소량으로 값싸게 생산하는 것이 바람직하며 전통

적인 4단계 공정에 압력균등화가 추가된 6단계 공정 정도로도 충분히 가능하다. 본 연구에서는 기본적인 4-step cycle에 압력균등화단계를 포함시킨 6-step cycle 실험을 통해 30%~40% 정도의 순도로 산소를 생산하는 PSA 공정의 조업 조건이 검토되었다. 여러 가지로 조업 변수들을 변화시키며 측정된 결과 저순도의 산소를 높은 회수율과 생산성으로 얻어내기 위한 조업 시간과 변수 값들을 결정할 수 있었다.

2. 이 론

PSA공정의 성능은 순도, 회수율, 그리고 생산성 이 세 가지 파라미터로서 측정된다.[3] 순도는 생산된 제품의 체적 평균치이고, 회수율은 공급되는 혼합물 중의 회수 대상이 되는 성분이 얼마만큼 생산물로 회수되었는지를 나타내는 척도이다. 즉 생산물 중에 포함된 성분의 양을 공급혼합물 중의 그 성분의 양으로 나누어 준 것으로 측정된다. 회수율은 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$R(\%) = \frac{\int [v_p(t) \times y(t)]}{v_f \times 0.209} \quad (1)$$

여기서 R은 회수율이고 y 는 생성물의 농도이며 v 는 속도로서 하첨자 p 와 f 는 생산물(product)과 공급원료 혼합물(feed)을 나타낸다. 0.2093은 공기 중의 산소의 부피%가 20.93%이므로 공급혼합물의 속도에 곱해주어야 한다. 생산성은 단위량의 흡착제당 및 단위 시간당 처리해준 생산물의 양으로 측정된다. 기체의 흡착분리 공정에 있어서 생산성(productivity)이란 상업화를 목적으로 하는 공정에서 매우 중요한 요소이다. 더구나 공기분리 PSA공정에서 공기라는 원료는 그 자체로는 비용이 전혀 들지 않는 무한한 원료이다. 이렇게 무한한 원료를 단위시간당 단위 흡착제 무게 당 생산해 낼 수 있는 생산물의 양이 크다는 것은 매우 큰 이점이다. 이러한 이점은 장치의 소형화를 가져올 수 있어 장치비용의 절감을 기대할 수 있다. 생산성은 단위량의 흡착제당 및 단위 시간당 처리해준 생산물의 양으로 측정된다.

3. 실 험

본 실험의 전체적인 개요는 압력이 주기적으로 변하는 흡착탑에 공기를 통과시켜 산소를 농축 생산하는 것이다. 이를 위해 Figure 1.에 나타낸 두 탑 PSA system이 사용되었다. 실험장치는 크게 길이 100cm, 내경 5.1cm로 제작된 두 개의 흡착탑과 한 개의 moisture trap, 그리고 한 개의 product tank(20 l)로 이루어져 있다. 흡착제는 molecular sieve 5A를, 공급기체는 99.99% Air를 사용하였다.

흡착탑을 200℃이상의 고온과 10^{-3} kg/cm²이하의 압력으로 12시간

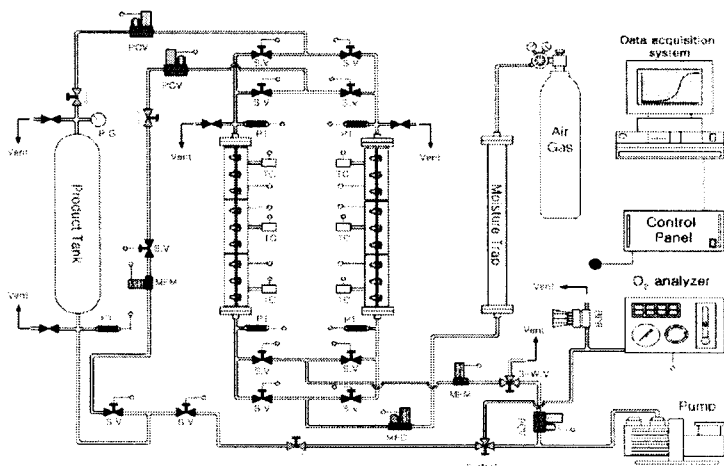


Figure 1. Schematic diagram of two-beds PSA apparatus

PSA 연속공정의 실험을 수행하였다. 조업 시간을 달리하면서 진행된 실험 결과를 통해 순도, 회수율, 생산성이 얻어졌고 이를 비교하였다. 이번 실험에서는 30% 이상의 저순도 산소를 생산하면서 가장 높은 회수율과 생산성을 기록하는 조업변수를 최적화 조건의 기준으로 결정하였다.

4. 결과 및 토론

Figure 2.는 가압시간 225초, 흡착시간 100초, 흡착압력 3.5atm, 탈착압력 1.0atm, 원료유량 3500ml/min, 퍼지유량 900mi/min 에서 압력균등화시간을 5초에서부터 5초씩 늘려가며 순도와 회수율 그리고 생산성을 측정 한 그래프이다. 압력균등화시간이 포함 될 경우 탑을 일정수준의 압력까지 가압하는 과정을 단지 두 탑을 연결하는 것만으로 수행하기 때문에 생산성 면에서 상당히 유리함을 알 수 있고 버려야할 기체를 다른 탑을 가압하는데 이용하므로 회수율 면에서 상당한 증가를 가져오게 된다. 최초에 고압의 탑의 출구 부분과 저압의 탑의 출구부분을 연결하였기 때문에 약흡착질의 순도가 높은 기체가 저압의 탑 출구 쪽으로 이동하여 강흡착질의 농도파면이 고르게 되는 효과가 발생하면 제품의 순도를 향상시킬 것이라 가정하였다. 하지만 실제로는 가압에 이용되는 기체는 원료인 공기보다 질소의 농도가 상당히 높은 상태로 도입되면서 생산되는 제품의 순도를 떨어뜨렸다. 압력균등화 시간을 15초로 했을 때 10초인 경우에 비해 순도, 회수율, 생산성 모두 감소하였는데 이는 생산되는 기체의 양은 거의 변하지 않는데 반해 순도가 감소함으로써 나타난 결과이다.

Figure 3.은 압력균등화 시간을 최고의 효율을 나타낸 10초로 고정하고, 흡착시간 100초, 흡착압력 3.5atm, 탈착압력 1.0atm, 원료유량 3500ml/min, 퍼지유량 900mi/min

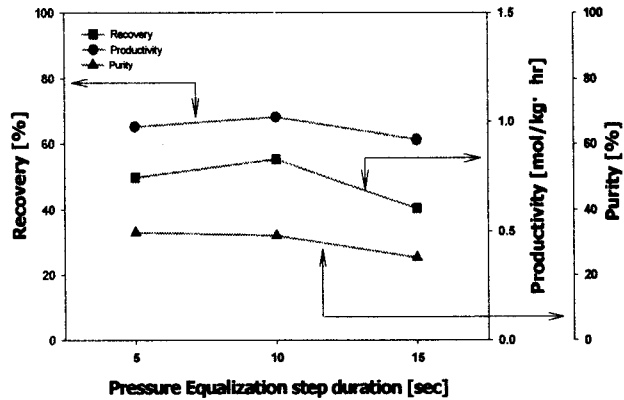


Figure 2. Effect of pressure equalization step duration on recovery, productivity, and purity

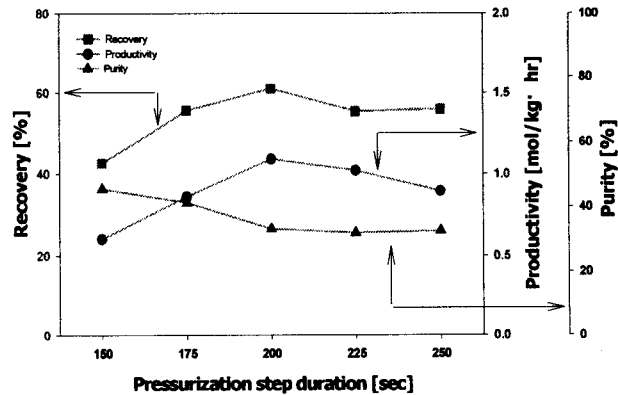


Figure 3. Effect of pressurization step duration on recovery, productivity, and purity

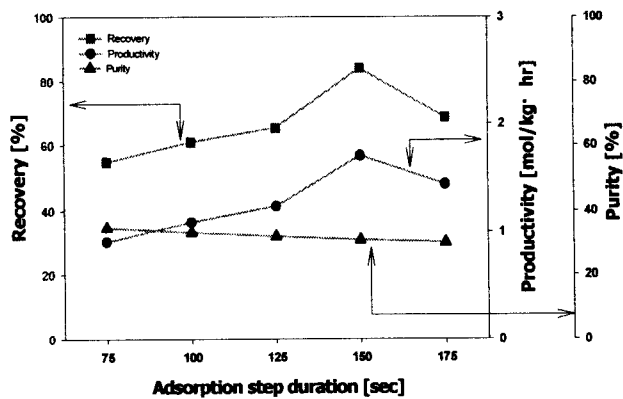


Figure 4. Effect of adsorption step duration on recovery, productivity, and purity

에서 가압스텝 시간을 150초에서 25초씩 늘려가며 순도와 회수율 그리고 생산성을 측정한 그래프이다. 일반적으로 가압시간이 원하는 압력까지 도달시키기에 부족한 경우 강흡착질인 질소의 농도과면이 출구까지 충분히 도달하지 않은 시간에 생산이 이루어지게 되므로 순도는 증가한다. 그러나 생산시간의 일부가 가압에 쓰이면서 생산성과 회수율은 감소하게 되는데 본 실험 범위에서는 가압이 완료되기에 충분한 시간이므로 가압시간이 늘어남에 따라 생산성과 회수율은 점차 증가하는 추세를 보였다. 이 때 모든 결과에서 가장 높은 값을 보인 200초가 적절한 가압시간으로 정해졌고 다시 흡착시간을 75초에서 25초씩 증가시켜가며 구한 그래프를 Figure 4.에 나타내었다. 흡착시간이 늘어남에 따라 흡착탑에서 산소가 생산되는 시간이 충분히 주어져 product 탱크로 유입되는 생산 유량이 증가함으로써 회수율과 생산성이 향상되지만 순도는 낮아지게 된다. 하지만 그래프에서도 나타나듯이 흡착시간이 지나치게 길어질 경우 흡착되지 않고 빠져나오는 질소의 영향으로 순도와 회수율, 생산성이 모두 저하되므로 그 이상의 구간은 고려할 필요가 없다. 따라서 가장 높은 회수율과 생산성을 보인 150초를 조업에서의 흡착시간으로 결정하였다.

5. 결 론

Molecular sieve 5A를 이용하여 공기로부터 산소를 농축시키기 위한 실험이 수행되었다. 가압-흡착-감압-세정단계로 이루어진 전통적인 4-step cycle에 압력균등화를 포함시킨 6-step cycle을 적용한 결과 생산물의 순도가 같을 때 회수율과 생산성이 더 높은 것으로 나타나서 향상된 결과를 보였다. 순차적인 실험을 통해 30~40% 정도의 저순도 산소 생산을 목적으로 하는 PSA 공정의 최적 조업 시간을 검토한 결과 각각의 스텝에 최적의 시간이 존재함을 알 수 있었다. 공급공기유량 3500ml/min(NTP), 퍼지유량 900ml/min(NTP), 흡착압력 3.5atm, 탈착압력 1.0atm의 실험조건 내에서의 조업시간으로 가압시간은 200초, 흡착시간은 150초, 압력균등화 시간은 10초일 때 가장 좋은 결과를 보이는 것으로 판단되었다. 이러한 최적의 결과들은 본 연구에서 사용한 molecular sieve 5A로부터 얻어지는 제품산소의 회수율과 생산성을 기준으로 한 것이다. 원하는 제품산소 순도나 회수율의 기준이 달라짐에 따라 조업변수들 역시 바뀔 수 있다. 본 연구 결과는 PSA 공정을 설계할 때 목표로 하는 수도를 달성하면서 회수율과 생산성을 극대화하기 위한 조업변수 값을 찾아내는데 도움이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. P. Guerin de Montgareuil and D. Domine, U.S. Patent 3,155,468(1964), to Societe L air Liquide, Paris.
2. Mendes A.M.M, Rodrigues A.E, "Oxygen separation from air by PSA: modelling and experimental results", Separation and purification technology, 24(1), 173-188 (2001)
3. Ralph T. Yang, "Adsorption : Fundamentals and Applications", Wiley-interscience, (2003)
4. 김준형, "2탑 PSA 공정의 성능평가", 홍익대학교 대학원 석사학위 논문, (2003)
5. Phillips C. Wankat, "Rate-controlled separations", Blackie academic & professional, an imprint of Chapman & Hall, (1994)