

Rapid Pressure Swing Adsorption (RPSA) 공정을 이용한 공기에서의 산소 분리

최재욱, 이화웅, 송형근, 서성섭[†], 나병기^{†*}

한국과학기술연구원 에너지환경연구본부
136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1

[†]홍익대학교 화학공학과
121-791 서울 마포구 상수동 72-1

[†]충북대학교 화학공학부
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410

(2008년 2월 21일 접수, 2008년 3월 12일 채택)

Separation of Oxygen from Air using Rapid Pressure Swing Adsorption (RPSA) Process

Jae-Wook Choi, Hwaung Lee, Hyung Keun Song, Sung-Sup Suh[†], and Byung-Ki Na^{†*}

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

[†]Department of Chemical Engineering, Hongik University
72-1 Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 121-791, Korea

[†]School of Chemical Engineering, Chungbuk National University
410 Sungbong-ro, Heungduk-gu, Chungbuk 361-763, Korea

(Received for review February 21, 2008; Revision accepted March 12, 2008)

요 약

RPSA 공정은 기체 혼합물을 흡착법을 이용하여 분리하는 주기적인 공정으로 일반적인 방법의 적용이 어려운 기체 혼합물의 분리에 적용될 수 있다. 공기로부터 분리된 산소는 의료용 산소발생기, 생물학적 폐수처리 공정 등에 이용되어 왔으며 다른 공정에서의 적용이 점차 확대되고 있다. RPSA 공정은 한 개의 흡착탑을 이용하여 분리하므로 기존의 PSA공정에 비해서 장치의 구성이 간단하다. 본 연구에서는 공기로부터 산소를 농축하는 RPSA 공정의 기초연구를 통하여 산소농축공정 개발을 위한 기초자료와 제반 기술을 확립하고자 한다.

주제어 : RPSA, 흡착법, 공기, 산소발생기

Abstract : RPSA (Rapid Pressure Swing Adsorption) is a cyclic process which can be used to separate gas mixtures by adsorption method. Oxygen which is separated from air is used to the medical oxygen generator and biological wastewater treatment process. RPSA uses only one adsorption bed, so it is very simple to operate compared to conventional PSA process. In this work experimental parameters were examined with RPSA setup and parameters for the oxygen separation from air were obtained.

Key words : RPSA, Adsorption, Air, Oxygen generator

1. 서 론

기체 혼합물을 분리하는 공정 중에서 각 성분의 흡착성을

이용하여 물질을 분리하는 흡착공정은 1970년대 이후 환경오염 인자를 배출하지 않는 환경친화적인 공정으로서, 그리고 에너지집약적인 산업으로서 주목을 받고 있으며, 특히 일반적

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

인 분리공정의 적용이 어려운 경우에 대안으로 제시되어 왔다. 기상의 흡착질이 선택적으로 흡착되는 흡착특성과 압력에 따라 흡착되는 흡착질의 양이 변하는 물리적 특성을 이용하여 기체를 분리하는 Pressure Swing Adsorption (PSA) 공정은 Skarstrom에 의해 최초로 제시된 이후 여러 방면에 이용되어지고 있다[1].

Rapid Pressure Swing Adsorption (RPSA) 공정은 일반 PSA 공정과 달리 기체의 평형흡착량 차이를 이용하는 것이 아니라, 흡착제 내에서의 기체의 확산속도의 차이를 이용하여 혼합기체를 분리해 낸다. RPSA 공정은 일반적으로 하나의 흡착탑에서 이루어지며 Figure 1에 나타내었듯이 기본적으로 두 개의 단계로 구성되어 있다[2]. 가압단계 및 감압단계는 수 초의 매우 짧은 시간 내에 일어나며, 각 단계의 길이는 거의 비슷하다. 가압단계에서는 고압의 공기가 흡착탑으로 유입되어, 강흡착질인 질소가 Zeolite 5A에 흡착되고 약흡착질인 산소는 흡착탑의 출구로 배출된다. 가압단계가 끝나면 흡착탑을 재생하기 위한 감압단계가 이어진다. 이 단계에서는 원료 기체의 공급이 중단되며 흡착탑의 입구를 통하여 강흡착질인 질소와 미량의 산소가 대기압 상태로 방출되며, 흡착탑의 출구로는 고순도로 농축된 산소가 계속 배출된다. 따라서 일반 PSA 공정과는 달리 감압단계에서도 원하는 목적물이 계속 생산되므로 목적물의 회수율을 높일 수 있고 흡착제의 생산성을 향상시킬 수 있다.

위와 같은 기본 2단계 공정에 지연단계를 추가하여 가압, 지연, 감압으로 구성되는 3단계 공정이 있다. 이 공정에서는 가압과 감압의 중간 단계에 지연단계를 추가하여 흡착물의 생산성과 회수율을 증가시키는 것을 목적으로 하고 있다 [3-5]. 지연단계에서는 원료 기체의 공급을 중단하고 흡착탑을 고압으로 유지시킴으로써 물질전달대가 흡착탑의 출구 방

향으로 이동하게 된다. 즉, 원료 기체를 도입하지 않고 가압 단계와 같은 효과를 얻을 수 있으므로 고순도의 생산물을 추가적으로 얻을 수 있다. 최근에는 피스톤이나 멤브레인을 이용한 공정에 관한 연구가 보고되고 있다 [6, 7].

따라서 본 연구에서는 공기로부터 산소를 농축하는 단탑 RPSA 공정의 기초 연구를 통하여 산소농축공정 개발을 위한 기초자료와 제반기술을 확립하고 공정을 최적화하여 의료용 산소발생기를 개발하고자 한다.

2. 실험

실험장치는 원료공급부, 배출부, 흡착탑 및 측정부로 나눌 수 있다. 원료공급부는 고압가스용기로부터 원료인 공기가 공급되는 부분으로 고압가스용기, 압력조절기, 솔레노이드 밸브, 압력계로 구성되어있다. 공급되는 공기의 압력은 압력조절기를 사용하여 유지시켰다. 솔레노이드 밸브의 개폐는 PLC(Programmable Logic Controller, LG산전, Master-K10s)에 의해 1/100초 단위로 조절되어진다. 배출부는 흡착탑 상부에 흡착되어 있는 강흡착질 성분이 배출되어지는 부분으로 솔레노이드 밸브와 버퍼탱크(Buffer tank) 및 wet test meter(Precision Scientific Inc.)로 이루어져있다. 솔레노이드 밸브는 위에서와 같이 PLC에 의해 조절되며, 감압단계에서 배출되는 유량을 측정하기 위해 wet test meter를 설치하였다. 버퍼탱크는 생산물로 배출되는 산소의 유량을 일정하게 유지시키기 위해 설치하였다. 가압과 감압시에 흡착제가 흡착탑에서 유출되는 것을 방지하기 위해 흡착탑의 양 끝에 600 mesh의 sieve를 설치하였다. 측정부는 흡착탑에서 질소와 산소가 분리되어 생산물로 얻어지는 산소의 농도를 측정하는 부분으로 샘플탱크(Sample tank), 버퍼탱크, 버블유량측정기(Bubble flow meter) 및 기

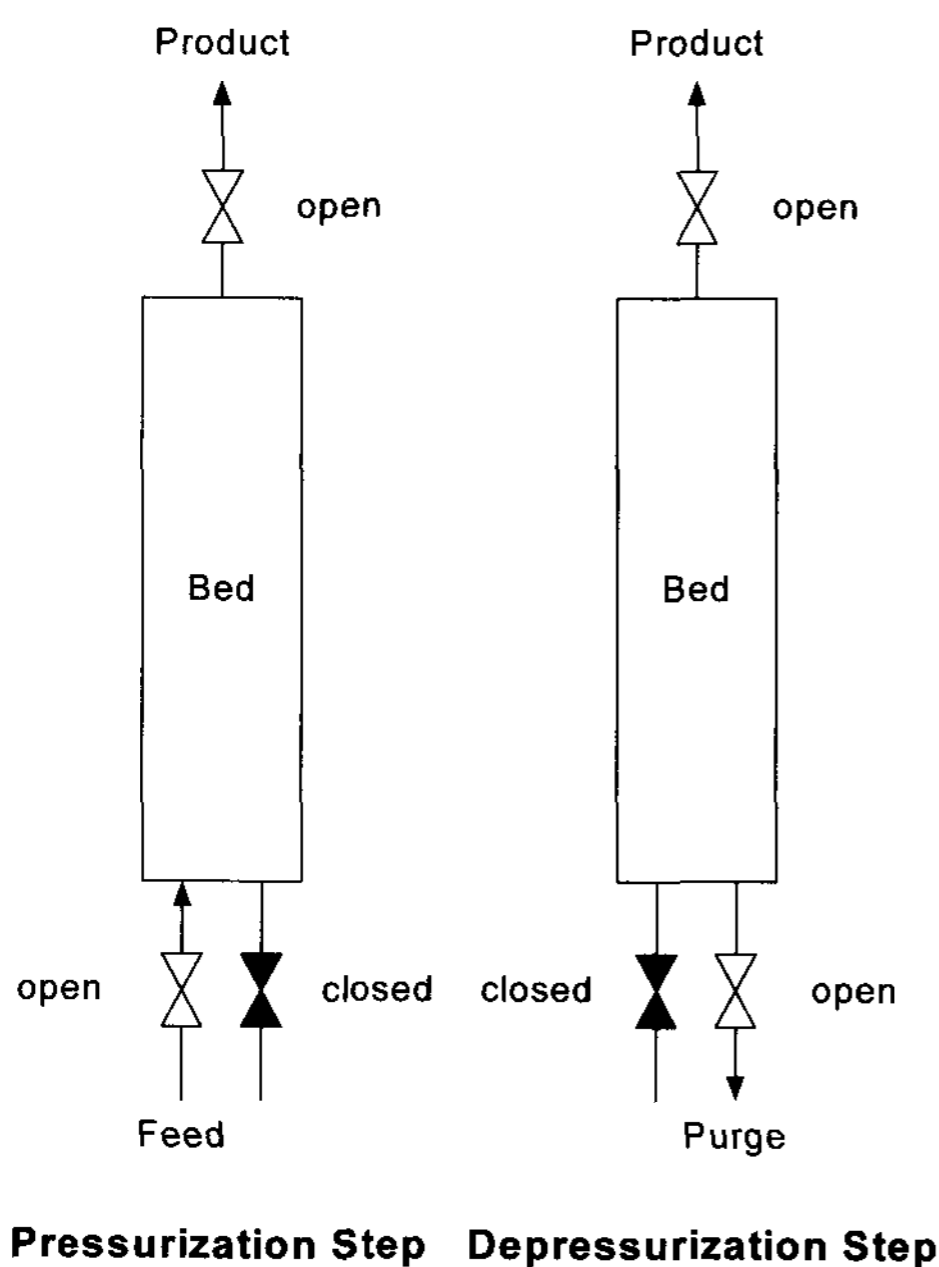


Figure 1. Two step operation of RPSA process.

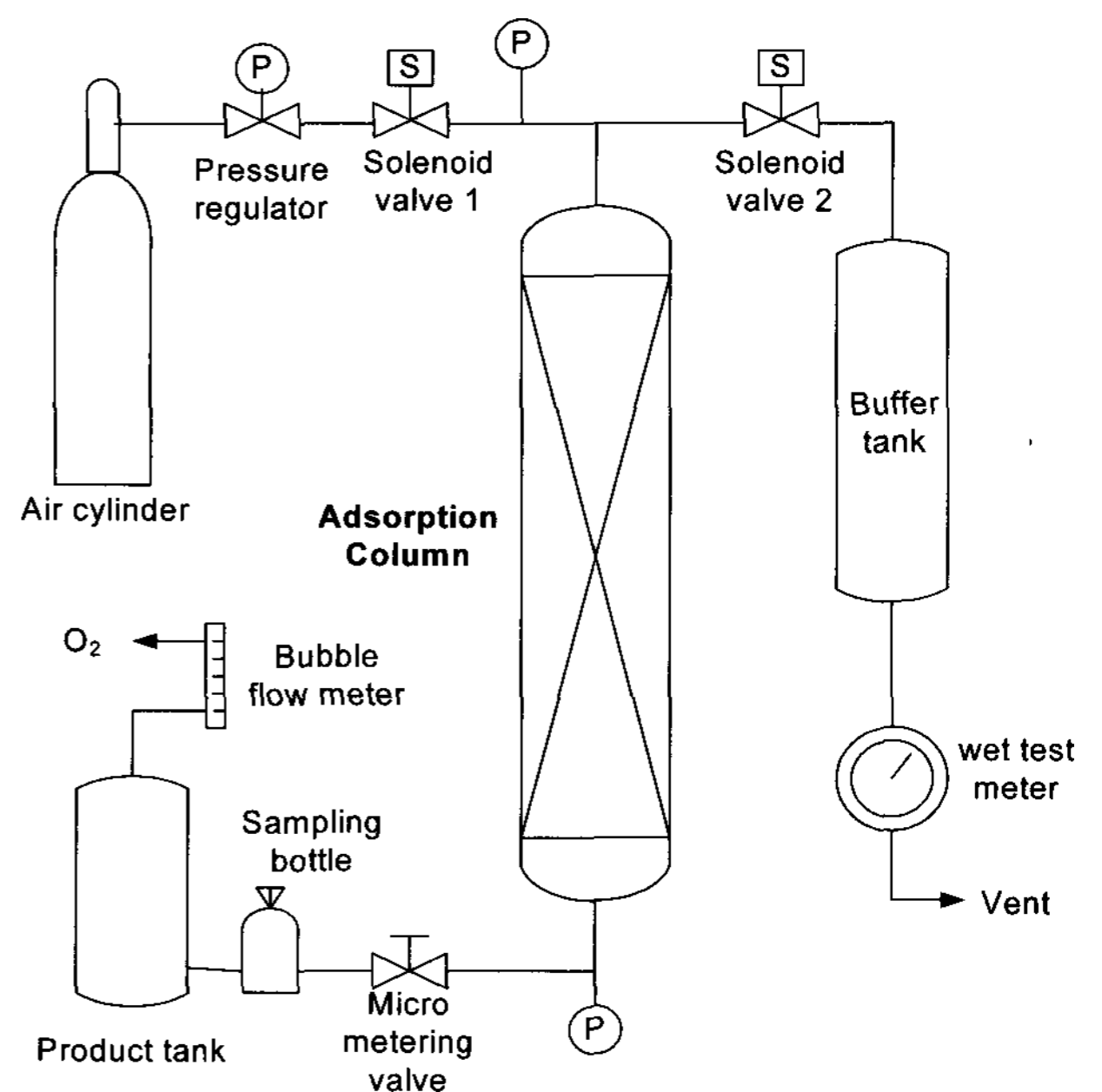


Figure 2. Schematic diagram of RPSA air separation unit.

Table 1. Physical properties of adsorbent for RPSA unit

Adsorbent	Zeolite Molecular Sieve 5A
Particle size	60/80 mesh
Bed length	50, 75, 100cm
Bed diameter	2.5, 5cm
Bed bulk density	0.83g/cm ³
Porosity	0.34

체크로마토그래피(Shimadzu 14A)로 구성되어있다. 샘플은 syringe로 일정시간마다 채취하여 기체크로마토그래피를 이용하여 분석을 하였으며, 측정부에 있는 버블유량측정기와 배출부의 wet test meter로 각각의 유량을 측정하여 총 유량을 구하였다. 실험장치의 개략도를 Figure 2에 나타내었다.

흡착탑은 길이에 따른 효과를 관찰하기 위하여 내경이 5 cm이고 길이가 각각 50 cm, 75 cm 및 100 cm인 탑을, 그리고 반경방향의 효과를 알아보기 위하여 길이가 50 cm이고 내경이 각각 2.5 cm, 5 cm인 탑을 제작하였다. 흡착제는 질소에 대하여 높은 선택성을 갖고 있는 Zeolite 5A(60/80 mesh, powder, Aldrich)를 사용하였으며 흡착탑 및 흡착제의 특성을 Table 1에 나타내었다. 실험을 하기 전에 Zeolite에 흡착되어 있는 수분을 제거하기 위해서 350℃에서 4시간 동안 밴드히터로 열처리를 하였다. 열처리 시 아르곤이나 헬륨과 같은 불활성기체를 흘려보내 수분의 탈착이 원활히 이루어지도록 하였다. 열처리가 끝나면 흡착탑에 공기를 흘려보내면서 흡착탑의 온도가 상온으로 떨어질 때까지 방치하였다.

원료기체의 공급압력, 공급시간 그리고 감압시간 등은 RPSA 공정의 분리성능에 매우 큰 영향을 미치며, 이러한 변수들은 생산물의 유량과 생성속도에도 독립적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 원료기체의 공급압력을 10~20 psig, 원료기체의 공급시간을 1~5초, 감압시간을 0.5~10초 범위에서 변화시켜 가면서 실험하였다.

공기분리 PSA 공정의 경우 산소와 아르곤의 흡착특성이 매우 유사하여 이 두 기체를 완전히 분리할 수 없기 때문에 실제로는 산소와 아르곤이 동시에 생산물로써 얻어지게 된다[1]. 생산물인 산소의 순도를 분석할 때에 아르곤의 분율을 고려하면 산소의 순도가 기체크로마토그래피에서 100%일 때 순수 산소의 순도는 95% 정도이며, 이 수치는 mass spectrometer를 이용하여 확인하였다. 실제 산소 농도 분석 시에는 산소의 순도가 100%인 경우에는 정확하게 계산되지만, 순도가 낮은 경우에는 아르곤의 분율을 정확히 알 수 없기 때문에 아르곤의 분율을 따로 고려하지 않았다.

3. 결과 및 검토

3.1. 원료기체 공급단계 대비 감압단계 시간의 비율 (F/B)의 영향

가압단계, 흡착단계, 감압단계, 정화단계 그리고 압력균등화단계 등의 여러 단계로 구성된 다탑의 PSA 공정에 비해 단

탑의 RPSA공정은 원료기체 공급단계와 감압단계로만 구성되어있다. 원료기체 공급단계는 PSA공정에서의 가압단계와 흡착단계의 혼합 단계로 그리고 감압단계는 PSA 공정의 감압단계와 퍼지단계의 혼합 단계로 볼 수 있다. RPSA 공정은 그 특성상 흡착탑 입출구의 압력차가 매우 크기 때문에 감압단계가 수행되는 과정에서 원료기체 도입부의 압력이 상압까지 낮아지는 경우에도 출구 쪽의 압력은 상당시간 유지되게 된다. 이는 매우 작은 흡착제를 이용하기 때문에 생기는 흡착탑의 압력강하 때문이며 이로 인하여 감압이 일어나는 과정에서도 산소를 계속적으로 생산물로써 얻을 수 있는 것이다. 따라서 RPSA 공정은 원료기체 공급단계와 감압단계에서 연속적으로 생산물을 얻게 되며 각 순간마다 흡착탑 내부의 압력 분포가 달라지는 특성을 가지고 있다.

RPSA공정에 있어서 원료기체 공급단계 대비 감압단계 시간의 비율(F/B 비율)은 생산물의 순도와 생성량을 결정하는데 큰 영향을 미친다. 원료기체 공급단계의 시간이 길면 강흡착질인 질소가 탑 출구 쪽으로 많이 이동하거나 흡착탑 내부 전체가 공기로 포화되어 질소가 출구 쪽으로 배출되기 시작하므로 생산물인 산소의 순도를 저하시키는 결과를 가져온다. 감압단계에서는 탑 출구 쪽의 고농도 산소가 압력차에 의해 입구 쪽으로 이동하며 탑 입구부를 재생시키는 세정 역할을 하게 된다. 따라서 감압단계가 긴 경우는 탑 내부에 흡착되어 있던 강흡착질인 질소가 많이 탈착되어 생산물인 산소의 순도는 높일 수 있으나, 입구 쪽으로 손실되는 산소 양의 증가에 의해 회수율이 저하되고, 또한 출구 쪽의 압력이 계속 저하되기 때문에 생산물의 배출속도도 떨어지게 된다. 원료기체 공급압력이 20 psig, 흡착탑의 길이가 100 cm, 내경이 2.5 cm인 경우에 대하여, F/B 비율이 생산물인 산소의 순도와 생성량에 미치는 영향을 Figure 3과 Figure 4에 나타내었다. Figure 3에서 보듯이 같은 원료기체 공급 시간에 대하여 F/B 비율이 작을수록 순도는 증가하게 된다. 이는 감압단계의 시

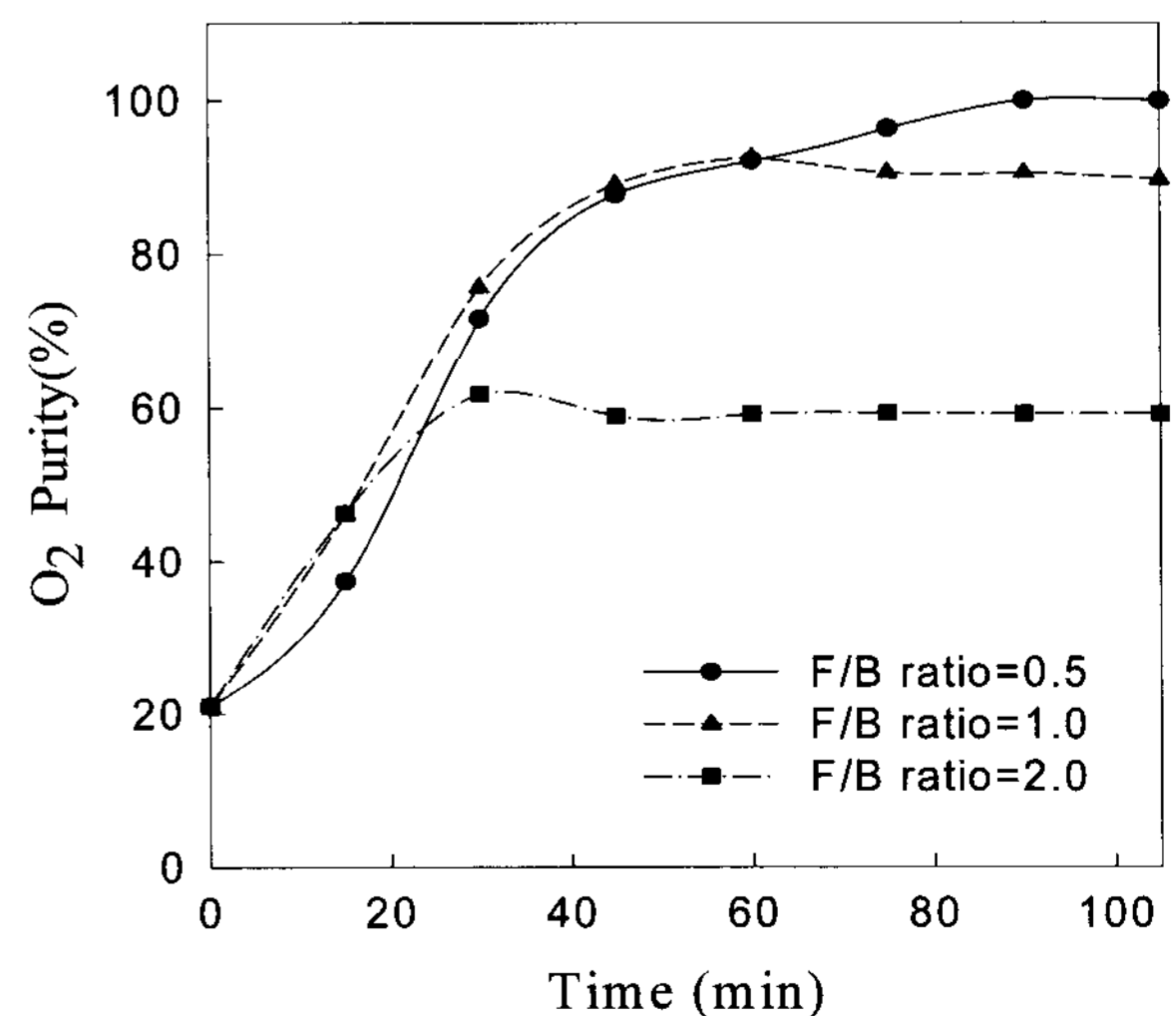


Figure 3. The tendency to reach the steady state at feed pressure = 20 psig, feed time = 3 sec, bed length = 100 cm, and bed diameter = 2.5 cm.

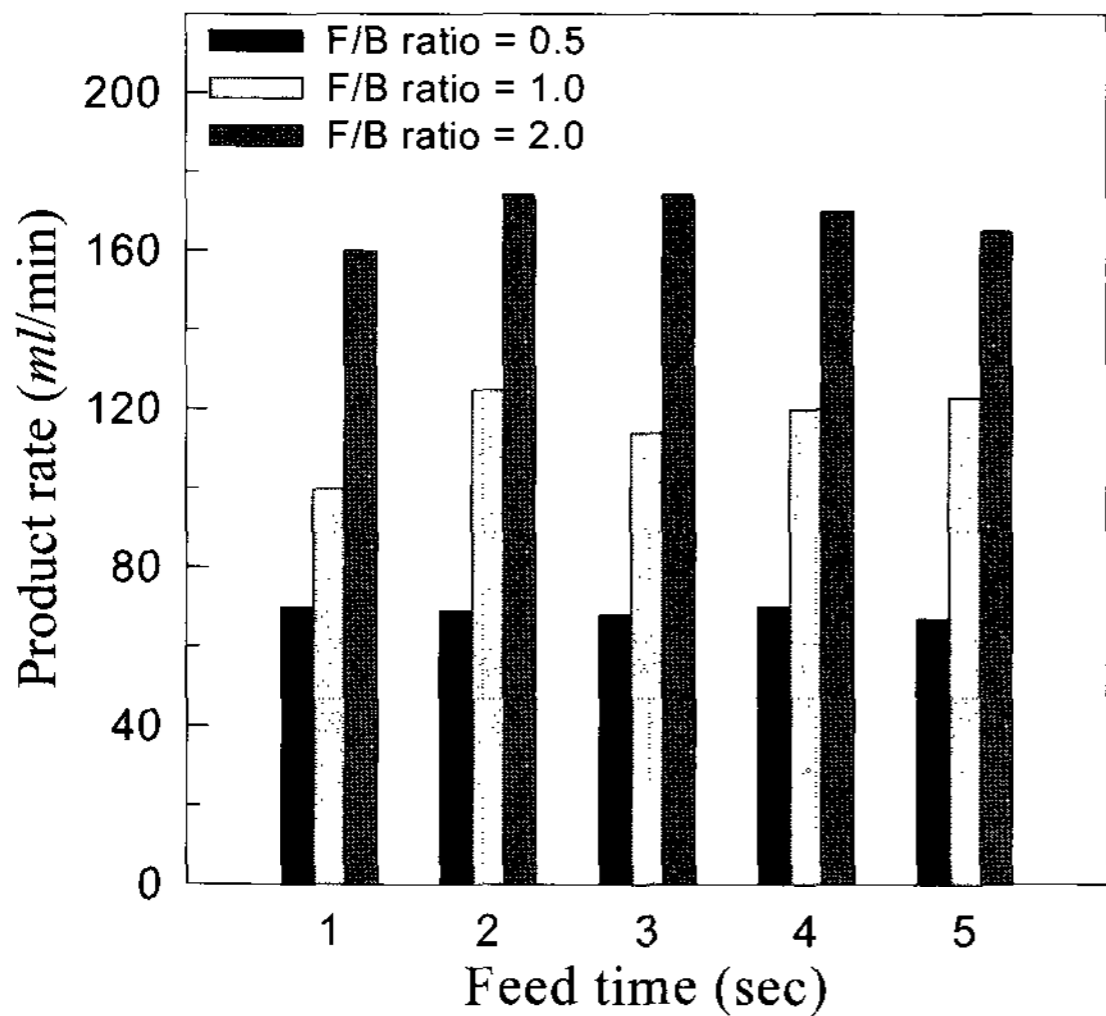


Figure 4. The effect of F/B ratio and feed time on the product rate at feed pressure = 20 psig, bed length = 100 cm, and bed diameter = 2.5 cm.

간이 길어질수록 흡착탑 내부에 흡착되어 있던 질소가 산소에 의해 탈착이 많이 이루어지기 때문에 생산물의 순도는 증가하게 되는 것이다. 원료기체 공급단계의 시간이 증가할수록 각각의 F/B 비율에 대한 생산물의 순도는 초기에는 증가하는 경향을 보이나, 공급시간이 더욱 길어지면 오히려 감소하는 현상이 나타남을 볼 수 있다. F/B 비율이 0.5인 경우는 감압단계의 시간이 원료공급시간의 두 배가 됨을 의미하며 질소의 탈착이 상대적으로 많이 이루어지기 때문에 상당히 짧은 공급 시간에서도 높은 순도를 보여 초기의 순도 증가가 크게 눈에 띄지 않으며, 반대로 F/B 비율이 2인 경우는 원료공급 시간 5초까지는 계속 증가하는 경향을 나타내어 원료공급 시간을 더욱 늘릴 수 있는 가능성을 보였으나 순도가 60% 대에서 머물러 시간의 증가가 큰 의미는 없는 것으로 보인다. 이러한 이유에서 다른 영향을 알아보기 위한 실험은 원료기체 공급시간을 3초로 하고 실험을 수행하였다. 다음으로 F/B 비율이 생산물의 유량에 미치는 영향을 Figure 4에 나타내었다. F/B 비율이 같은 경우에는 원료기체 공급시간의 변화에 따른 생산물의 유량에는 차이가 없지만 같은 공급시간에 대하여는 F/B 비율이 클수록 생산물의 생성량은 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 F/B 비율이 큰 경우는 감압단계의 시간이 원료기체 공급시간보다 짧기 때문에 흡착탑 내의 압력이 상대적으로 높게 유지되게 되고, 이는 곧 생산물 유량의 증가로 나타나는 것이다. 그러나 Figure 3에서 나타난 바와 같이 F/B 비율의 증가는 탑 입구부분의 질소의 탈착이 적게 이루어지기 때문에 순도의 감소를 초래하게 되어 생산물 흐름의 유량은 증가하나 실제 산소의 양은 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 이는 일반적인 PSA 공정에서와 같이 순도와 회수율의 반비례 관계를 보여주는 현상으로서 목적에 맞는 순도와 회수율을 결정하여 조업할 필요가 있음을 보여주는 것이다.

여기서 또 한 가지 주목해야 할 점은 F/B 비율과 순도와

Table 2. Effluent pressures and product rates according to the F/B ratio

F/B ratio	Feed time (sec)	Blowdown time (sec)	P _H (psig)	P _L (psig)	Product rate (ml/min)	Purity (%)
2	3	1.5	20	15	174	63
1	3	3	20	12	125	91
0.5	3	6	20	7	68	100
0.5	2	4	20	7	69	100
0.5	1	2	20	7	70	100

관계이다. 생산물의 유량은 당연히 출구부의 압력에 의해서 결정된다. 그러나 순도의 경우는 원료기체 도입압력과 출구부의 압력 차이에 의해서 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다. 이들의 비교를 위해서 원료기체 도입압력 20 psig인 경우에 대하여 각 F/B 비율에 따른 출구부의 압력과 그때의 순도 및 배출량을 비교하여 Table 2에 나타내었다.

감압단계가 짧은 경우 배출되는 기체의 양이 감소하여 탑 내의 압력은 상대적으로 높게 유지되며 이 F/B 비율에 의해서 자연스럽게 배출부의 압력이 조절되게 된다. 이 배출부의 압력은 조업시간 전체를 통해 거의 일정하게 유지된다. 즉, 원료기체의 도입압력과 F/B 비율이 결정되면 탑 하부의 압력은 원료기체 도입시간에 관계없이 임의로 결정되게 된다. 이때 두 압력의 압력차가 클수록 순도가 높아지는 경향을 보이게 된다. 이러한 사실은 RPSA 공정의 조업에서 매우 중요한 사항으로서, 유입되는 유량과 시간에 관계없이 압력과 F/B 비율을 이용하여 어느 정도 결과를 예측할 수 있다는 사실을 의미하기 때문이다.

3.2. 원료기체 공급압력의 영향

고압에서의 흡착량과 저압에서의 흡착량의 차이에 의해 흡착질을 분리하는 기존의 PSA공정과 마찬가지로 RPSA공정에서도 원료기체의 공급압력과 감압단계인 상압과의 차이에 의해 혼합기체가 분리된다. 따라서 기존의 PSA공정과 마찬가지로 단탑의 RPSA공정에서도 흡착압력은 매우 중요한 변수이다. 특히 PSA공정에 비해 크기가 매우 작은 흡착제를 사용하는 RPSA공정에서는 원료기체 공급압력에 의해 흡착제가 파손되거나 원료 기체의 마찰에 의한 결합제의 손실로 인한 흡착 능력의 저하가 발생할 수 있다. 따라서 흡착제에 대한 한계 압력을 설정해 놓아야 한다. 흡착층의 길이가 100 cm, 내경이 2.5 cm, F/B 비율이 0.5 그리고 원료기체 공급시간이 3초인 경우에 대하여 원료기체 공급압력이 생산물의 순도에 미치는 영향을 Figure 5에 나타내었다. Figure 5에서 볼 수 있는 바와 같이 원료기체의 공급압력이 높을수록 생산물의 순도 및 양이 증가됨을 알 수 있다. 이는 일반적인 PSA 공정과 마찬가지로 고압에서의 흡착량이 많아지는 기체의 흡착특성 때문에 얻어지는 결과로서, 입구부의 압력이 높아지면 질소의 흡착량이 많아지게 되어 상대적인 산소와 질소의 이동 속도차가 커지게 되어 순도가 증가하게 되는 것이다. 또한 원

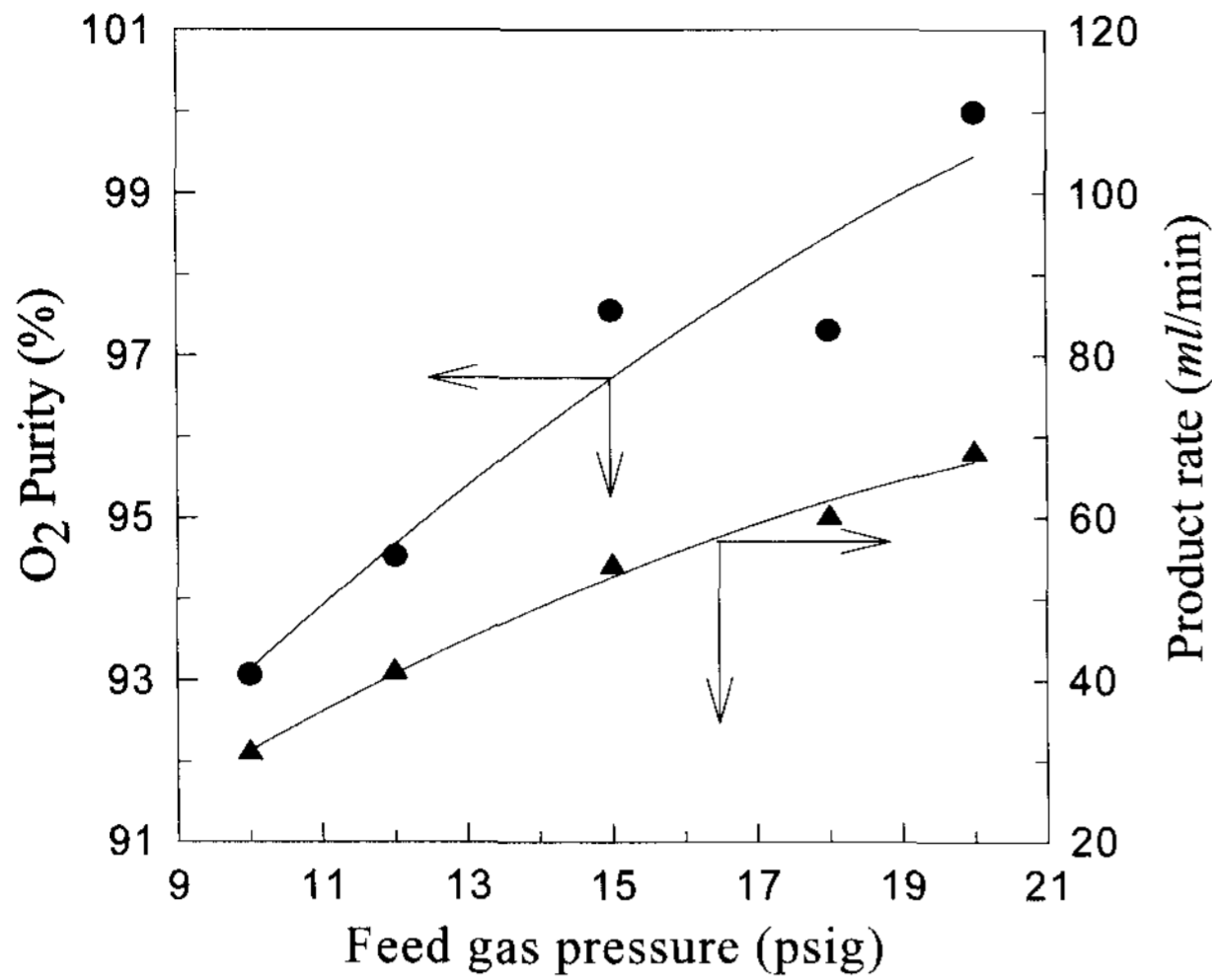


Figure 5. The effect of feed pressure on the O₂ purity and product rate at ID 2.5 cm × length 100 cm, F/B = 0.5, and feed time = 3 sec.

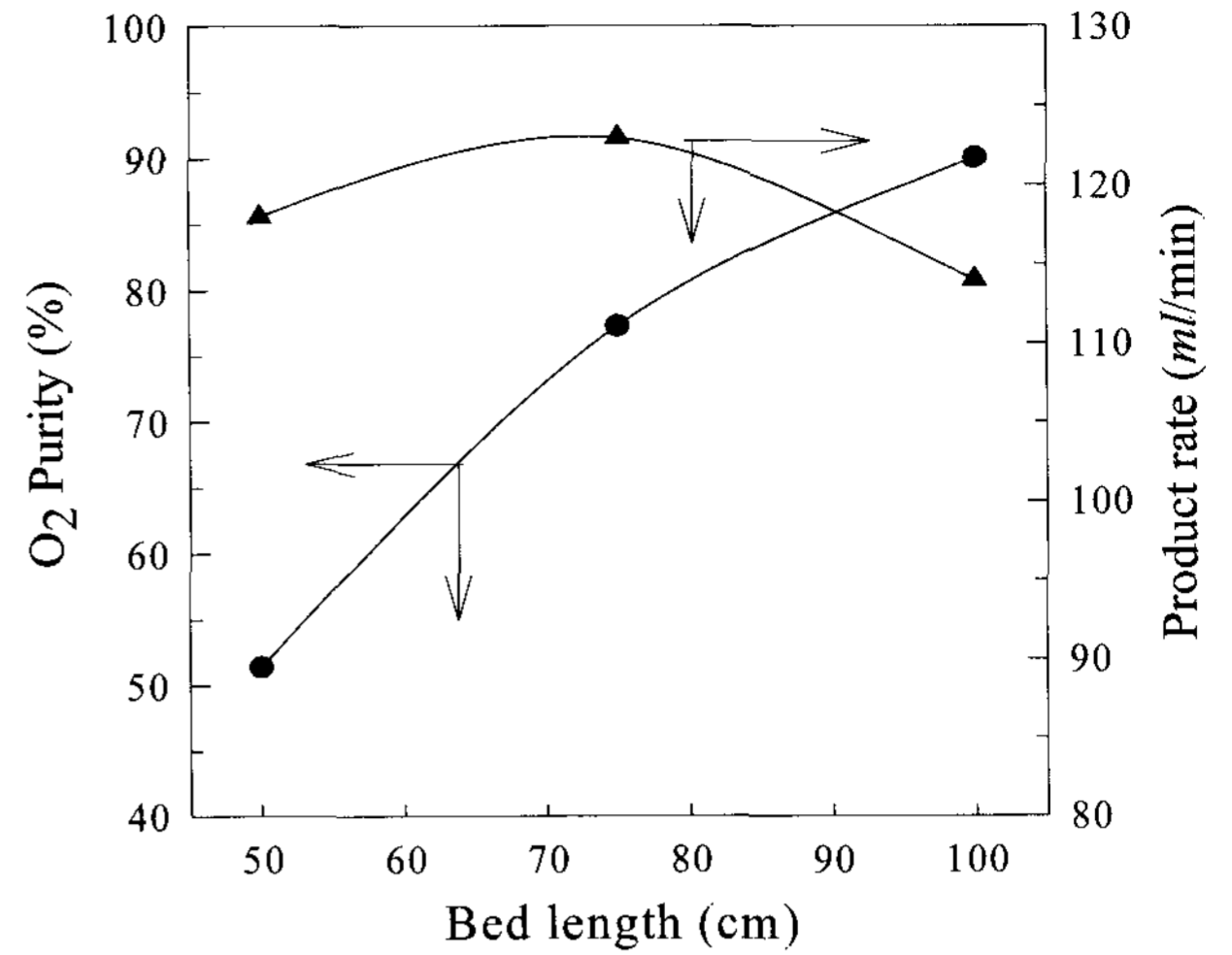


Figure 6. The effect of bed length on the O₂ purity and product rate at bed diameter = 2.5 cm, feed pressure = 20 psig, F/B = 1.0, and feed time = 3 sec.

료기체의 공급 압력을 높이면 탑 출구부의 압력도 함께 상승하게 되는데 이는 산소의 배출량 증가로 나타나게 된다. 하지만, 향류감압단계에서 상대적으로 큰 압력차에 의해서 약 흡착질인 산소의 배출이 함께 증가하게 되어 회수율은 감소하게 된다. 이 현상은 원료기체 공급압력이 높은 경우의 생산물 배출량의 증가비율이 압력증가에 의한 원료기체 양이 증가하는 비율보다 상대적으로 작음을 의미하는데, 이 현상은 Chou and Wu[8]의 연구에서도 잘 나타나 있다. 이 결과는 앞에서 보인 원료기체 공급압력과 배출기체 압력과의 차이에 의해서도 분석할 수 있는데, 원료기체의 공급압력이 증가하면 상대적으로 흡착탑 입출구 사이의 압력차가 증대되어 순도의 증가를 가져온다고 볼 수 있다. 실제로 원료기체 도입압력이 10 psig인 경우 산소 출구부의 압력은 3~4 psig 정도를 유지하나, 압력을 20 psig로 올리게 되면 출구부의 압력이 7~8 psig 정도로 상승되게 되어 양단간의 압력차는 더욱 커지게 된다.

원료기체의 공급압력이 높을수록 순도와 생성량이 많아지는 하지만 앞서서도 언급한 바와 같이 압력이 너무 높은 경우에는 흡착제가 파손되는 결과를 가져온다. 실제로 본 연구의 실험에서도 원료기체의 공급압력이 30 psig를 넘는 경우에는 많은 양의 흡착제가 파손되어 배출되는 현상을 볼 수 있었으며 탑의 압력강하가 더욱 커지는 결과로 인해 장시간의 조업이 불가능하게 되었다. 이러한 이유에서 본 연구에서는 원료기체 공급압력을 10 psig와 20 psig 사이에서 조업하여 압력 변화의 영향을 관찰하였으며 그 결과, 원료기체 공급단계와 감압단계를 각각 3 초, 6 초로 조업하였을 때 원료기체 공급 압력이 가장 큰 20 psig에서 최대의 순도를 갖는 생산물을 얻을 수 있었다.

3.3. 흡착탑 길이 및 내경의 영향

단탑의 RPSA공정은 전형적인 PSA공정과는 달리 공정의

단계가 원료기체 공급단계 및 감압단계로 제한되어 있기 때문에 공정의 cycle 구성에 의한 순도의 증가보다 흡착탑 길이 및 내경과 같은 장치의 외형조건이 생산물의 순도에 미치는 영향이 더욱 크다고 볼 수 있다. 그러나 기존의 연구에서는 고정된 흡착탑을 이용하여 사이클이나, 흡착제 크기 등 실험 변수를 바꾸어 그 영향을 고찰한 경우가 대부분이었으나 실제로 흡착탑의 규모가 공정의 성능에 어떠한 영향을 주게 될지는 고려하지 않았다.

본 연구에서는 흡착탑 내경이 2.5 cm 일 때의 흡착탑의 길이가 서로 다른(50 cm, 75 cm 그리고 100 cm) 각각의 경우와 흡착탑 길이가 50 cm로 일정할 때 내경이 2.5 cm 와 5 cm인 각각의 경우에 대하여 흡착탑의 구조 및 규모가 생산물의 순도 및 생성량에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 먼저 흡착탑 길이 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여 내경 2.5 cm인 흡착탑에서 원료기체 공급압력 20 psig, F/B 비율 1.0, 흡착시간 3초인 경우를 흡착탑 길이에 따라 실험하여 그 결과를 Figure 6에 나타내었다. Figure 6에서 볼 수 있듯이 흡착탑의 길이가 길어질수록 순도는 증가하는데, 이는 흡착탑의 길이가 길어질수록 강흡착질인 질소와 약흡착질인 산소의 이동 거리의 차이가 더욱 커지게 되어 분리효율이 증가하여 생산물로 얻어지는 산소의 순도는 더욱 높아지게 된다. 하지만 산소의 배출량에는 커다란 영향이 없는데, 이는 탑 출구부의 압력 때문으로, 흡착탑이 길어질 경우 흡착탑 자체의 압력차가 증가하게 되어 탑 내의 압력분포가 달라지게 되기 때문이다. 따라서 산소의 생성부인 탑 출구부의 압력은 흡착탑의 길이가 긴 경우 약간 낮게 유지된다. 또한 이 경우 감소한 출구 압력의 영향으로 산소의 배출량이 감소하는 결과를 나타내어 전체적으로 산소의 배출량 증가는 나타나지 않게 된다. 공급기체 압력과 출구부 압력과의 차이가 증가하면 앞서서도 언급한 바와 같이 순도가 증가하며 이 경향은 흡착탑 길이변화의 결과에도 동일하게 적용될 수 있다. 따라서 원료기체의 공

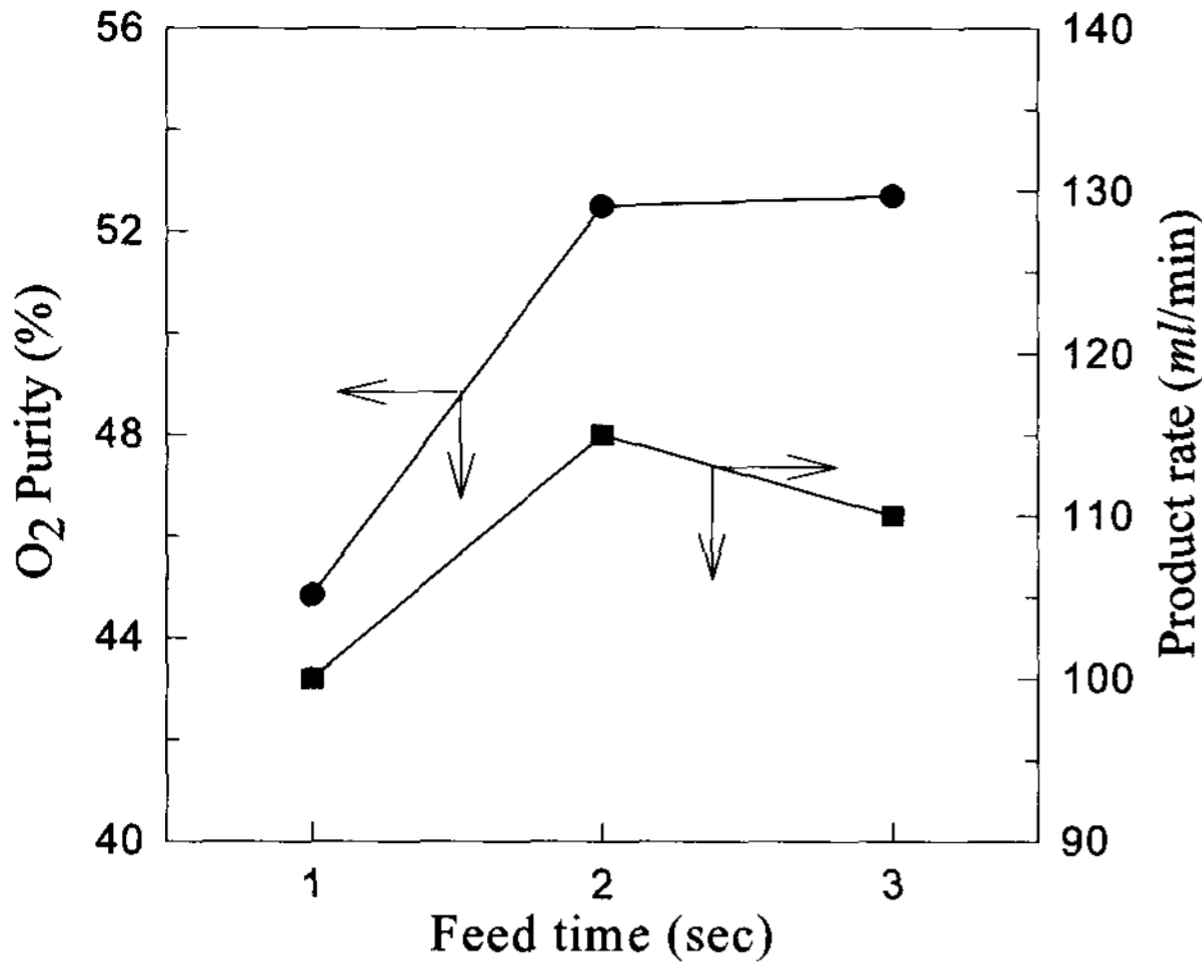


Figure 7. The O₂ purity and product rate at bed diameter = 5 cm, bed length = 50 cm, feed pressure = 20 psig, and F/B ratio = 1.0.

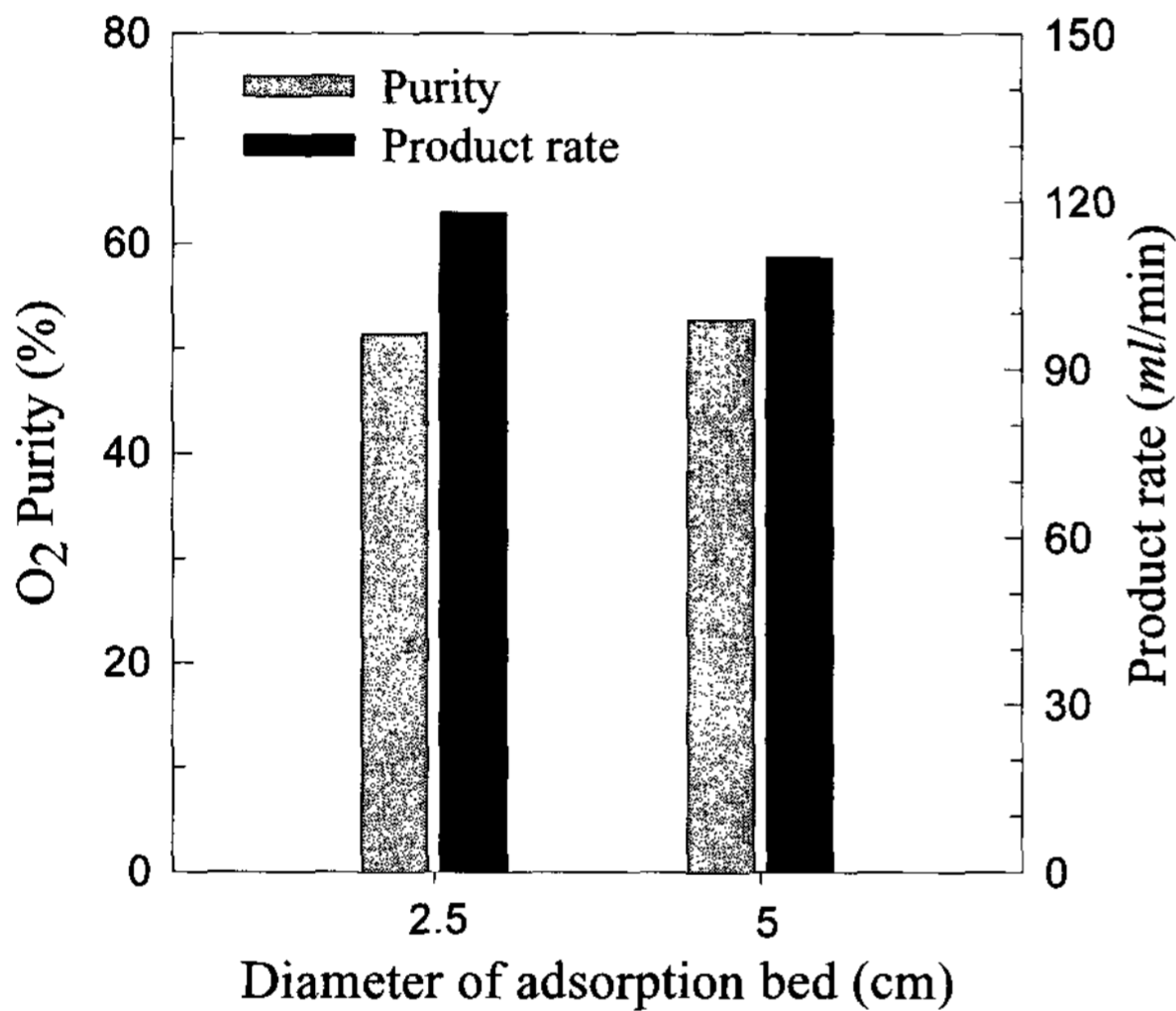


Figure 8. The effect of bed diameter on the purity and product rate at bed length = 50 cm, feed pressure = 20 psig, F/B ratio = 1.0, and feed time = 3 sec.

급압력이 일정한 경우 즉, 도입되는 원료기체의 양이 비슷한 경우에 흡착탑 길이의 증가는 곧 원료기체 도입압력의 증가와 유사한 효과를 가져오게 되며, 이는 원료기체의 도입압력을 많이 높이기 어려운 경우 매우 효과적인 대안이 될 수 있을 것으로 보인다.

다음으로 흡착탑 내경 변화의 영향을 알아보면, 길이가 50 cm이고 내경이 5 cm인 흡착탑을 이용하여 F/B 비율이 1인 경우를 원료기체 공급시간을 변화시키면서 실험하였을 때 순도와 산소의 생성량을 나타낸 것이 Figure 7이고, 내경이 5 cm인 경우와 2.5 cm인 경우를 위의 실험과 동일한 조건에서 흡착시간을 3초로 하고 실험한 결과를 나타낸 것이 Figure 8이다. 흡착탑 내경이 커진 경우에도 작은 경우와 마찬가지로 흡착시

간의 증가에 따라 초기에 순도가 증가하는 경향을 볼 수 있는데 이 경우에도 원료기체 공급시간 3초까지는 순도의 감소는 나타나지 않았다. 또한 앞서와 마찬가지로 산소의 생성량은 거의 변화가 없음을 관찰할 수 있었다. 또한 흡착탑의 내경이 두 배로 커지더라도 생산물의 순도와 생성속도에는 큰 변화가 없음을 Figure 8을 통해 알 수 있는데, 흡착탑 내부에 충전된 흡착제의 질량이 증가했음에도 불구하고, 순도 면에서 커다란 증가가 없었던 것은 흡착탑 내의 기체 흐름분포가 원인이라고 생각할 수 있다. 흡착탑의 내경이 커지게 되면 같은 원료기체 도입압력에서 조업하였을 때에도 흡착탑 내부로 유입되는 원료기체의 양은 증가하는 것으로 나타났으나 탑 내의 기체흐름 선속도가 감소하기 때문에 압력을 올리는데 시간이 더 필요하게 된다. 따라서 내경이 작은 경우보다 큰 경우가 흡착탑 출구부의 압력이 낮게 형성되게 된다. 따라서 압력차가 커지게 되므로 순도가 향상될 것으로 기대되지만 이 경우는 분리의 원동력인 산소와 질소의 이동거리의 차가 상대적으로 짧아지게 되므로 두 기체의 분리효율이 감소하게 되어 순도의 증가가 크지 않은 것으로 판단된다. 생산물 배출량의 경우, 흡착탑의 내경이 두 배로 커지는 경우, 본 연구의 실험에서는 같은 원료기체 도입압력에서도 흡착탑 내부로 유입되는 원료기체의 양이 30% 정도 증가하는 것으로 나타났으며, 이 때문에 증가하는 생산물의 양이 생산물 흐름의 압력이 낮아짐으로 해서 생기는 유량의 감소와 상쇄되기 때문에 내경이 작은 경우와 배출 유량 면에서 큰 차이가 없게 되는 것으로 볼 수 있다. 흡착탑 내경을 증가시켜 순도 및 생산량을 증가시키기 위해서는 원료기체의 도입유량을 흡착탑 증가에 비례하여 같이 증가시키거나 원료기체 공급압력을 더욱 높여주어야 할 것이다. 이를 위해서는 같은 크기의 도입관을 이용하는 것은 한계가 있기 때문에 원료기체 도입부의 도입관 크기를 함께 늘려주어야 한다. 이는 곧 scale-up의 효과가 있게 되는 것이므로, 동일한 조건에서라면 흡착탑의 내경을 늘이는 것은 순도 향상에 바람직한 방향이 아님을 알 수 있다. 따라서 생산물의 순도를 증가시키기 위해서는 흡착탑의 내경을 증가시키기보다는 흡착탑의 길이를 증가시키는 것이 올바른 방법으로 판단된다.

4. 결 론

단탑 RPSA 공정을 이용한 산소 농축에서 F/B 비율, 원료기체공급압력, 및 흡착탑의 길이 및 내경이 생성물의 순도에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. 원료기체 공급시간에 대한 감압시간의 비인 F/B 비율이 0.5인 조건에서 생성물의 순도는 각 원료기체 공급시간에 대하여 95%로 가장 높았는데, 이때의 조건은 흡착탑 길이 100 cm, 내경이 2.5 cm이고 원료기체 도입시간이 3초인 경우였다. 생성물의 순도 및 생성 속도에 가장 크게 영향을 미치는 변수는 원료기체 공급압력으로써 압력이 증가할수록 강흡착질의 흡착량이 증가하여 생성물의 순도와 생성량도 증가하였다. 또한 흡착탑의 외형조건의 영향을 알아보기 위한 실험에서 흡착탑의 길이와 내경의 변

화에 대하여 살펴본 결과, 흡착탑의 길이가 길어질수록 생성물의 순도가 증가하였지만 흡착탑의 내경은 순도에 크게 영향을 미치지 못하였다.

감 사

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음에 감사드립니다.

참고문헌

1. Yang, R. T. "Gas Separation by Adsorption Processes" Butterworths, Boston, 1987.
2. Turnock, P. H., and Kadlec, R. H., "Separation of Nitrogen and Methane via Periodic Adsorption," *AIChE J.*, **17**, 335-342 (1971).
3. Jones, R. L., Keller II, G. E., and Wells, R. C., "Rapid Pressure Swing Adsorption Process with High Enrichment Factor," U.S. Patent No. 4,194,892 (1980).
4. Keller II, G. E. and Jones, R. L., "A New Process for Adsorption Separation of Gas Stream in Adsorption and Ion Exchange with Synthetic Zeolites," *ACS Symp. Ser.*, **135**, 275-286 (1980).
5. Jones, R. L., Keller II, G. E., "Pressure Swing Parametric Pumping: A New Adsorption Process," *J. Separ. Proc. Tech.*, **2**, 17-23 (1981).
6. Suzuki, M., Suzuki, T., Sakoda, A. and Izumi, J., "Piston-Driven Ultra Rapid Pressure Swing Adsorption," *Adsorption*, **2**(2), 111-119 (1996).
7. Bhaumik, S., Majumdar, S., and Sirkar, K. K., "Hollow-Fiber Membrane-Based Rapid Pressure Swing Absorption," *AIChE J.*, **42**(2), 409-421 (1996).
8. Chou, C. T. and Wu, H. C., "Zeolite and Related Microporous Materials: State of the Art," in Weitkamp, J., Karge, H. G., Pfeifer, H., and Holderich, W., Eds., *Studies in Surface Science and Catalysis*, Elsevier Science B.V., Amsterdam, **84**, 1225-1260 (1994).