

# 전력 절감을 위한 PSA방식의 산소 발생기 공정 최적화

지석환<sup>†</sup> · 이문규<sup>\*</sup> · 이태수<sup>\*\*</sup>

## Process optimization of PSA way Oxygen Concentrator for Electric Power Saving

Seok Hwan Chi, Moon Kyu Lee, Tae Soo Lee

**Key Words :** Electric power(전력), Optimization(최적화), Oxygen concentrator(산소 발생기), PSA process(PSA 공정)

### Abstract

As the importance of low power design is emphasized, power consumption became one of the standards that represent the performance of the system. The purpose of this study is to decide design variable that minimize power consumption for the oxygen concentrator in two bed-one compressor 8 step PSA process that has above 90% purity at 3lpm by using given constants and selected parameters. Setting selected parameters as cycle time and equalization time, optimization for PSA process in the oxygen concentrator is progressed. For this, we need to know the features and basic principals of PSA process and to deduce objective function of performance analysis. Validations for objective function and lots of experiments are needed too. By using the characteristic curve of the compressor and the pressure curve of the process for 1 cycle, objective function was set. After theoretical 2 dimensional optimized paths was obtained. And then, by experiment, theoretical optimized path was verified.

### 기호설명

$A_{cs}$  : 흡착탑의 단면적( $m^2$ )  
 $L$  : 흡착탑의 높이( $m$ )  
 $N_{pr}$  : 가압단계에서 유입되는 기체의 양( $mol$ )  
 $Q_{comp}$  : 압축기에서 토출하는 유량( $l/min$ )  
 $P_h$  : 흡착탑 내의 최고 압력( $N/m^2$ )  
 $V_{pu}$  : 세정단계에 필요한 기체의 부피( $m^3$ )  
 $\varepsilon$  : 공극율  
 $\xi$  : 순수 가압시간

### 1. 서론

최근 소비전력에 대한 소비자들의 관심이 증가하고 저전력 설계의 중요성이 강조되면서 소비전력이 시스템 성능을 나타내는 것이 하나의 지표로 등장 했으며, 소비전력을 줄이는 설계의 중요성이 커지고 있다.

민상 호흡 부전 환자의 치료에 산소 발생기의 사용이 증가함에 따라 산소발생기에서도 소비전력을 감소 시키는 설계의 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 순도가 90%이상인 산소 발생기에 있어서 주어진 상수와 선택된 매개 변수에 대하여 소비 전력이 최소가 되는 설계 변수를 결정하는 것이다.

### 2. 양탑형 8단계 PSA 공정의 설계 모델

기준에 성립되어 있는 이론 식인 KENT S. KNAEBEL 와 FRANK B. HILL의 모델을 근거로 질량 보존 방정식과 이상 기체 방정식, 흡착 평형

---

<sup>†</sup> 서강대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : hwanyfunny@sogang.ac.kr  
TEL : (02)712-1599 FAX : (02)712-0799

<sup>\*</sup> 서강대학교 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 서강대학교 기계공학과

---

이론 등을 이용하여 만든 수치적 모델을 흡착탑은 기체상과 고체상이 평형을 이루는 가상 균일체이며 이때의 기체는 이상기체이다. 또한 공정이 진행되는 동안은 등온 과정이며 흡착탑의 축방향 압력과 반경방향의 압력 및 농도의 변화는 무시한다. 그리고 기체의 흡착은 Langmuir의 흡착 등온식을 따르며 이때의 흡착등온선은 선형으로 표현되는 등의 가정들 전체로 제시하였다<sup>(1)</sup>.

## 2.1 PSA공정의 단계

PSA공정은 크게 네 단계로 나뉠 수 있다. 첫 번째로 가압단계이다. 흡착 탑은  $P_{eq}$ 에서 공기 압축기에 의해 가압이 시작된다. 흡착 탑의 하부로 유입되는 feed 기체에 의해 흡착 탑이  $P_{eq}$ 에서  $P_h$ 까지 가압하는 경우 흡착 탑 내부로 유입되는 공기 양은 다음과 같다<sup>(2,3)</sup>.

$$N_{pr} = \frac{\varepsilon A_{cs} L}{RT \beta_B [1 + (\beta - 1) y_{feed}]} (P_h - P_{eq}) \quad (1)$$

두 번째로 흡착단계이다. 흡착은  $P_h$ 에서 흡착 탑 안으로 지속적인 공기 압축기의 공급기체를 공급 받는 것을 전체로 계산한다. 따라서 이상 기체 상태방정식을 이용하여 공기의 양을 구하면 다음과 같다.

$$N_{feed} = \varepsilon A_{cs} \frac{P_h}{RT \beta_A} z_{pr} \quad (2)$$

세 번째로 감압단계이다. 내부 질소를 탈착시키는 세정 단계 전에 흡착 탑에서 감압 단계가 이루어진다. 흡착 탑 압력이  $P_l$ 로 감압되는 시간이 주어진다. 실험에서는 감압시간이 밸브의 유효 단면적 등에 영향을 받는다. 이론적으로 양탐형 공정은 감압의 시간과 가압의 시간이 동일하다.

마지막으로 세정단계이다. 세정과정은 생산 기체인 산소를 생산하지 않고 흡착 탑을 재생하는 단계이므로 기체가 흡착탑 길이  $L$ 만큼 이동한다고 하면, 흡착탑 세정을 위해 필요한 산소량은 다음과 같다<sup>(4)</sup>.

$$N_{pu} = \varepsilon A_{cs} L \frac{P_l}{\beta_A RT} \quad (3)$$

## 2.2 흡착 탑의 단면적

흡착 탑 내부를 흐르는 공급 기체의 속도는 기체 분리에 중요한 인자이다. 따라서 공기압축기의 유량과 흡착 탑의 단면적의 크기를 결정하는 것이 본 실험의 가장 우선 시 된다.  $P_h$ 의 압력에서 공기압축기에 의해 흡착 탑 하부로 공급 기체가 유입될 때, 공급기체의 속도를  $U_{feed}$ 라 하면 다음이 성립한다.

$$U_{feed} P_h \varepsilon A_{cs} = Q_{comp} = \frac{c}{P_h^m} P_l \quad (4)$$

레이놀즈 수를 결정한 후 그 값을 이용하여 계산하면, 공기압축기에 성능에 따른 흡착 탑의

유효한 단면적을 얻을 수 있다. 목적에 따라, 특히 흡착 탑의 크기를 조절하기 위해 레이놀즈 수를 조정할 수 있다. 레이놀즈 수를 크게 설정하면 단면적이 작아지는 효과를 볼 수 있다.

## 2.3 오리피스 지름 결정

한쪽 흡착 탑이 가압과 흡착의 단계에 있을 때, 흡착탑 상부로부터 생산 기체가 오리피스를 통해 반대쪽 흡착 탑으로 세정을 돕기 위해 흘러 들어가게 된다. 이 때 베르누이 방정식과 연속 방정식을 이용하여, 양 흡착 탑의 압력 차와 유입 되는 생산 기체의 양에 의해 오리피스의 지름을 구할 수 있다<sup>(5)</sup>.

$$P_h - P_l = \frac{1}{2} \rho \left( \frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right) U_1^2 \quad (5)$$

오리피스를 통해 흐르는 유량은 세정을 위해 필요한 생산 기체의 양  $N_{pu}$ 와 같다고 가정하면,

$$\frac{V_{pu}}{\text{Cycle time}} = A_1 U_1 \quad (6)$$

위 식을 구할 수 있는데 이를 이용하여  $U_1$ 을 구할 수 있다. 따라서 흡착 탑의 상단을 연결하는 오리피스 지름을 결정할 수 있다.

## 3. 실험 장치 구성 및 방법

### 3.1 실험 장치 구성

#### 3.1.1 실험 장치

2탑 1압축기를 이용한 8단계 PSA 공정을 구현하기 위한 흡착부를 구성하였다. 기본적으로 공기압축기, 흡착탑, 밸브, 탱크, 오리피스, 압력 조절기, 유량계 등으로 실제 공정을 구현하는 부분이다. 그리고 시스템을 제어하고 성능을 확인하기 위해 컴퓨터와 Lab view 7.1, 밸브 제어 회로, 적산 전력량계 등이 추가된다.

#### 3.1.2 실험 방법에 따른 단계별 특성

실험에서는 가압과 흡착단계의 구분이 모호하다. 따라서 일부 흡착이 될 것이다. 출구를 통해 생산 기체 뿐만 아니라 원료 기체까지 유출되므로 가압시간은 흡착 압력을 넘어 shock wave가 흡착 탑 출구를 넘어설 때까지 진행되지 않도록 해야 한다. 세정 기체 양에 따라 흡착제의 재생 비율과 생성 기체의 양이 영향을 받으므로 세정 기체의 양을 결정하는 것이 공정 시간을 결정하는데 있어서 중요한 요소가 된다.

#### 3.1.3 장치 구성 및 실험 방법

토출 압력과 공기 압축기의 유량과의 관계를 정확하게 나타낼 수 있는 관계식을 찾기 위해서 실험 장치를 구성하였다(Fig. 1). 실험순서는 공기 압축기에서 압축된 공기가 저장 탱크에 저장된다. 저장 탱크의 입 출구를 통해 유출입하는 공기량이

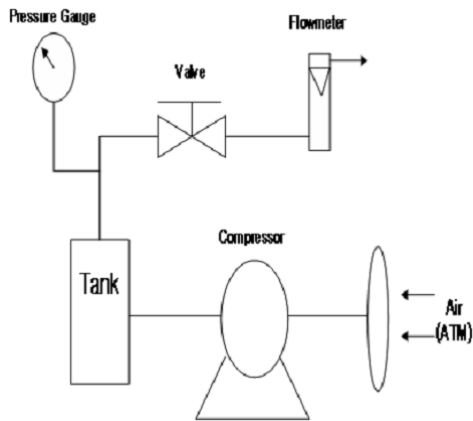


Fig. 1 Compressor Performance Tester

Table 1 the Result of Compressor Characteristic Experiment

Relative Pressure(bar)	Flow rate(lpm)	Power(W)
0.1	45	126
0.5	41	146
1	38	170
1.5	35	190
2	32	207
2.5	29	222
3	27	239

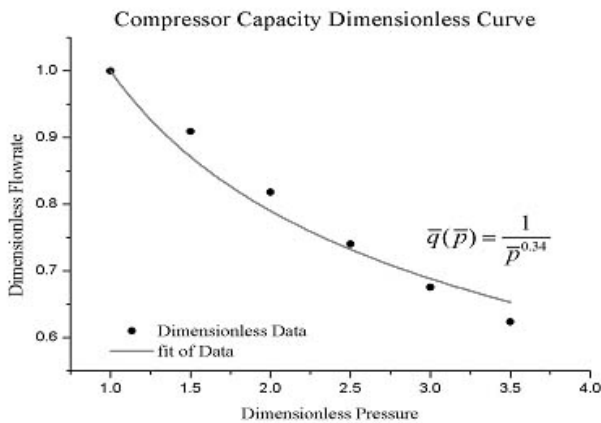


Fig. 2 Compressor Capacity Curve

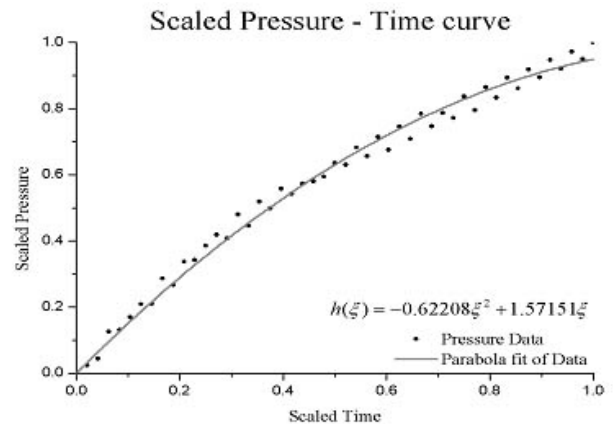


Fig. 3 Pressure-Time Curve

같아지는 상태를 압력 게이지와 유량게이지로 측정한다. 이러한 과정을 밸브를 변화시키면서 반복 실험을 하게 되며 유량과 압력과의 상관 관계를 얻을 수 있게 된다.

### 3.1.4 공기압축기 특성 실험

산소 발생기의 경우 소비전력의 약 90% 이상을 공기압축기에서 소비한다. 따라서 공기압축기의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 공기 압축기의 특성은 다음과 같이 표현하였다.

$$Q_{comp} = \frac{a}{p^m} \quad (7)$$

공기 압축기가 작동하는 전 영역에 대해 동일한  $Q_0, m$  계수를 가지는 것은 아니다. 따라서 본 연구에 필요한 압력 범위가 상대압력 0.1-3bar인 구간에서 측정을 하여  $Q_0=77, m=0.34$ 의 값을 구하였다(Fig. 2).

### 3.1.5 흡착탑 내부 압력

순수 가압시간에 따른 흡착탑내의 압력곡선을 구하기 위해 PSA공정을 이용하여 측정한다. 이때의 가압시간은 6.5s, 균등화 시간은 1.2s로 하여 측정하였다(Fig. 3).

## 4. 결 과

### 4.1 제올라이트의 기본 물성

본 연구에서 사용된 흡착제는 산소농축기에서 널리 사용되고 있는 Zeolite 5A이며, 흡착 탑 속 기체의 유속을 구하기 위한 레이놀즈 수 결정에 필요한 입자의 평균 크기는 0.0007m이다.

### 4.2 공기압축기의 특성 실험 결과

3lpm에서 90% 이상의 성능 사양을 갖춘 350mm의 소형 흡착 탑을 사용하였다. 공기 압축기의 압력을 상대압력 0.1bar부터 시작하여 0.5bar씩 증가하며 3bar까지 변화되는 토출유량에 따른 소비 전력을 측정하였다(Table 1).

### 4.3 이론적 설계 모델의 계산 결과

설계 변수의 최적화를 위해 변환법을 사용하였다. 이는 로그경계함수를 이용한 벌칙 함수를 적용한 것이다. 또한 최적점의 방향을 찾기 위하여 최속 하강법을 사용하였다. line searching을 하기 위해서는 황금 분할 탐색법을 사용하였고 이를 이용하여 스텝의 크기를 결정 하였다.

#### 4.3.1 목적함수의 도출 및 유효성

$$W = \phi_0 \times P \times Q [\text{Watts}] \quad (8)$$

$$\phi_0 = \int_0^1 \frac{h(\xi)d\xi}{\left[ \frac{P_h - P_{eq}}{P_{atm}} \times h(\xi) + \frac{P_{eq}}{P_{atm}} \right]^m} \quad (9)$$

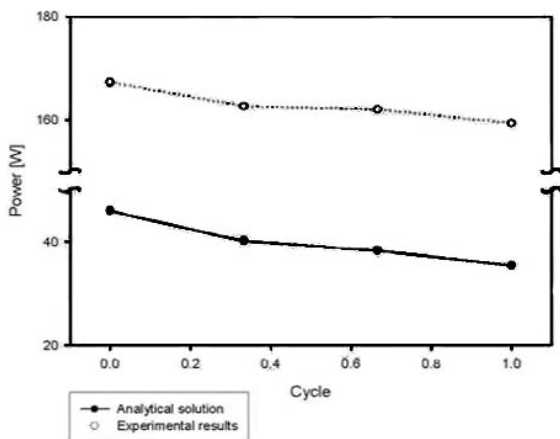
압력(P)는 흡착탑 내의 압력을 의미하며 유량(Q)는 압축기가 흡착탑 내로 유입시키는 유량을 의미한다.

흡착탑 내의 압력 변화를  $P_{eq}$ 에서  $P_h$ 로 가는 가압 과정까지를 고려하였으며,  $P_h$ 에서  $P_{eq}$ 로 가는 균등화 과정은 극히 짧은 시간 이므로 압축기의 소비전력에 영향을 주지 않는다고 가정하며, 또한 이전의 과정과 압력은 제외시킨다. 식을 이용하여 산소 발생기의 소비전력을 예측하였다(Table2). 이론 식의 타당성을 검증하기 위해서 이론 값의 변화하는 경향을 비교하여 판단한다. 때문에 압력의 변화, 즉  $P_{eq}$ 와  $P_h$ 의 변화에 따른 소비전력의 변화를 확인하기 위하여 오리피스 크기를 변화 시켜 가며 데이터를 측정 하였다.

$P_{eq}$ 와  $P_h$ 는 식에서 확인할 수 있듯이 그 값이 작아지면 전력이 작아짐을 확인할 수 있다. 본 연구에서 얻고자 하는 것은 실제의  $P_{eq}$ 와  $P_h$ 의 변화에 따라 측정된 실제 전력의 변화 량이 식을 통한 이론적으로 구해진 전력 값의 변화량과 같은 경향을 보인다(Fig. 4). 값에 차이를 보이는 것은 이론 식에 실제 공기 압축기의 효율과 에너지 손실을 나타내지 않은 것으로 효율과 에너지 손실을 포함하여 생각하면 실제의 소비 전력과 비슷할 것이다.

**Table 2** the Result of Power Consumption

$P_{eq}$	$P_h$	Predicted	Measured
1.80	2.61	46.04	167.24
1.72	2.42	40.23	162.61
1.70	2.37	38.39	162.00
1.68	2.30	35.48	159.34



**Fig. 4** Comparison between Theory and Experimental

#### 4.3.2 구속 조건

본 연구의 조건이 순도 90%이상의 공정이므로 우선 이를 구속조건으로 적용시켰으며, 그 외에 사전실험으로 규정했던 가압시간2~9s (0.5step)과 균등화 시간 0.3~2s(0.3step)를 각 설계변수에 대한 구속조건으로 정했다. 또한 가압 시간이 균등화 시간을 넘을 경우 순수 가압시간이 없어지므로 공정 자체가 이루어 질 수 없음을 적용하여 이 부분을 구속조건으로 적용하였다(Fig. 5).

#### 4.3.3 도식해

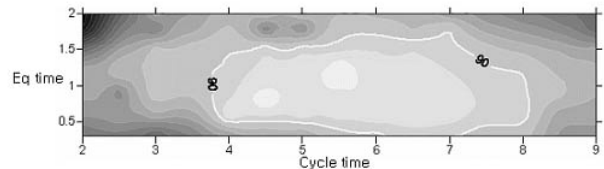
도식해를 살펴보면 구속조건을 순도 90%이상인 등고선으로 설정하였다. 실험 측정에서 얻을 수 있는 소비전력 값과 최고압력, 균등압력 값을 알 수 있으며 이를 이용하여 등고선을 그릴 경우 가압 시간이 커질수록 최고압력과 균등압력이 높아지고 소비전력이 높게 나옴을 알 수 있다.

#### 4.3.4 최적화 경로

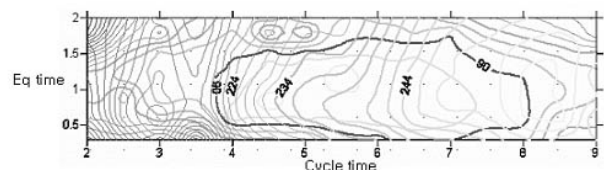
최적화를 위해 matlab을 사용하였다. 언급했던 바와 같이 목적함수로는 도출된 전력을 구하는 식을 이용하였고 각 구속조건을 적용시켰다. matlab coding은 5개의 하위 함수를 이용하였다. 초기 r값을 0.05로 주었으며 각 3배씩의 증가가 행해지도록 만들었다. 시작점을  $x_1=5s$ ,  $x_2=1s$ 로 정하였으며 이는 feasible region내에서 정하였다. 결과적으로 최적화된 점은  $x_1=4.02s$ ,  $x_2=1.43s$ 임을 알 수 있었다(Table 3).

**Table 3** the Result of Optimization

r	Cycle time	Equalization time	Purity	Power
0.05	5.12	1.35	92.68	74.73
0.15	4.44	1.46	91.37	62.76
0.45	4.29	1.45	90.42	61.10
1.05	4.04	1.42	90.04	59.60
3.15	4.03	1.43	90.01	59.45
9.45	4.02	1.43	90.00	59.38



**Fig. 5** Constraint Surface



**Fig. 6** Graphical Solution

## 5. 결 론

### 5.1 최적기법 이용 설계변수 도출

순도 90%이상의 산소발생기에 있어서 주어진 상수와 선택된 매개변수에 대하여 소비 전력이 최소가 되는 설계변수를 결정짓는 것이 본 연구의 목적이다. 설계변수는 가압시간과 균등화시간이며 log 경계를 이용한 최대 하강법을 이용하여 가압 시간은 4.02s, 균등화 시간은 1.43s인 결과를 얻었다. penalty parameter의 변화에 따른 수렴 정도에 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 또한 타당성이 검증된 목적함수를 이용하여  $P_h$ ,  $P_{eq}$ 의 값에 변화에 따른 예상 소비전력을 예측 할 수가 있다.

### 5.2 순도 분포에 따른 최적의 설계변수 도출 가능

앞서 언급한 설계변수의 최적화 도출에 있어서 필요한 순도분포에 대한 자료와  $P_h$ ,  $P_{eq}$ 의 값을 실험을 통해 갖추게 되면 본 논문에서 적용한 공정이 아닌 다른 공정에서도 최적 점을 찾을 수가 있다. 하위함수를 생성한 후 본 논문에서 사용한 코딩을 적용시키게 되면 그 공정에서 갖고 있는 순도를 구속조건을 중심으로 찾아가게 됨을 본 연구에서 알 수 있다.

## 6. 후 기

본 연구는 (주)옥서스 산학협력연구에 의해 이루어 졌으며 이에 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) R.T Yang, 1987, "Gas Separation by Adsorption Process," Butterworth
- (2) JOHN C. KAYSER, KENT S. KNAEBEL, 1986, *Chemical Engineering Science*, Vol. 41, No. 1 Printed in Great Britain
- (3) G. FORES FERNANDEZ, C. N. KENNEY, 1983, "Modeling of the Pressure Swing Air Separation Process," *Chemical Engineering Science*, Vol. 38 No. 6
- (4) Michael J. Matz, Kent S. Knaebel, 1988, *AIChE Journal*, Department of Chemical Engineering
- (5) Alexander J. Smits, 2002, "a Physical Introduction to Fluid Mechanics," Wiley