

# 고공 엔진시험을 위한 Dryer 개발

박범주\* · 김태인\*

## Dryer Design for High Altitude Engine Test

Berm-Joo Park\* · Tea-In Kim\*

### 초 록

엔진 성능의 시험에 있어서 작동유체인 압축공기의 물성중 수분은 매우 중요한 부분으로, 엔진의 작동과 성능에 영향을 미치는 대표적인 요인이다. 특히 고공환경 시험에서는 습도의 조건에 따라 성능의 차이가 커지므로 엔진의 정확한 성능과 운용성을 파악하는데 작동유체인 압축공기중에 포함된 수분의 조건은 대단히 중요하다.

압축상태인 작동유체의 수분 함유량을 고공의 조건과 같은  $-40^{\circ}\text{C}$  이하의 이슬점(Dew Point) 상태로 제습 하기 위한 장치인 흡착식 Air Dryer의 개발을 위해 흡착과정 및 재생과정에 대한 이해와 흡착제의 흡착효율을 극대화하고, 재생비용을 최소화하여 에너지를 저감 할 수 있는 Air Dryer System에 대하여 기술한다.

Key Words: Air dryer(제습장치), Adsorption(흡착), Adsorbent(흡착제), Regeneration(재생), Compressed Air(압축공기)

### 1. 서 론

제습장치에 사용하는 흡착제는 요구되어 지는 조건에 따라 다양하게 선택할 수 있다. 고공 엔진시험을 위해서 요구되어지는 제습장치는 일반 산업용에 비해 적용되는 조건등이 매우 상이하고 대용량이며, 각 시험조건에 따라 작동유체의 습도조건이 다르므로 이를 만족하기 위한 최적의, 흡착제(Adsorbent) 및 흡착과정(Drying) & 재생과정(Regeneration)을 수행하기 위한 system 구성이 필요하다. 흡착장치의 중요한 부분 중에 하나인 흡착탑(Adsorption Tank)의 설계조건과 재생과정에 필요한 장치등에 관하여 설명한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 흡착과정(Drying Process)

##### 2.1.1 흡착특성

흡착제는 매우 넓은 표면적과 기공을 갖고 있어, 상대습도가 낮은 영역 및 높은 영역에서의 서로 다른 흡착특성을 갖게 된다. 상대습도가 낮은 영역에서는 주로 흡착제의 표면에서 흡착이 이루어지며 상대습도가 높은 영역에서는 표면 및 기공에서의 흡착이 이루어진다.

표 1에서는 흡착제의 종류 및 특성을 간단하게 정리 하였고, 대표적인 흡착제인 활성알루미나에 대한 특성을 상대습도에 따라, 상대습도가 낮은 영역의 흡착특성을 그림 1에, 상대습도가 높은 영역의 흡착특성을 그림 2에 설명하였고, 그림 3은 흡착능력을 나타내었다.

\*(주)세양기업

연락처 E-mail: parkbj@seyangcorp.co.kr

Table 1 흡착제 종류 및 특성

흡착제	충진밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	평균 pore size(Å)	비표면적 (m <sup>2</sup> /g)	흡착능력 (g/g)
Activated Alumina	0.7~0.9	40~70	200~400	0.2~0.4
Silica gel	0.7~0.8	20~50	600~800	0.35~0.5
Molecular sieve	0.5~0.7	40~50	500~700	0.2~0.3

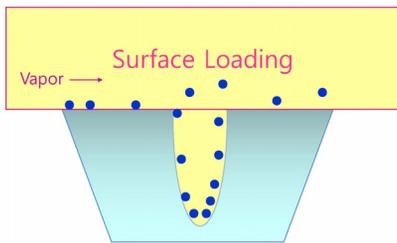


Fig. 1 Surface Loading

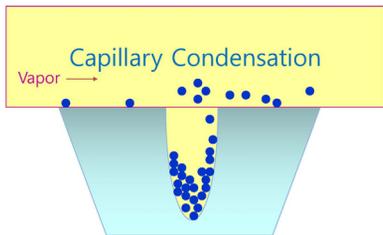


Fig. 2 Capillary Loading

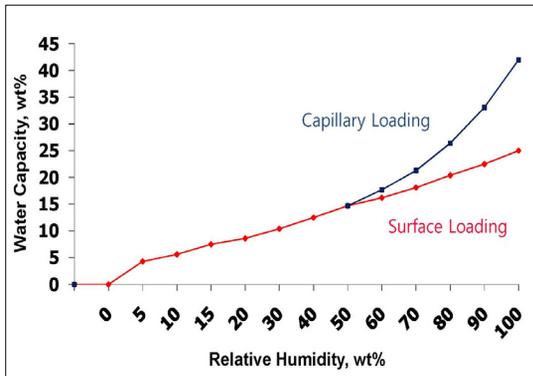


Fig. 3 Water Adsorption Isotherm for Activated Alumina

## 2.1.2 흡착 Process & 흡착열

그림 4 에서와 같이 흡착제는 수분을 흡착하기 위하여 넓은 표면적과 기공으로 이루어져있다. 흡착제에서의 흡착과정을 4단계로 설명하면,

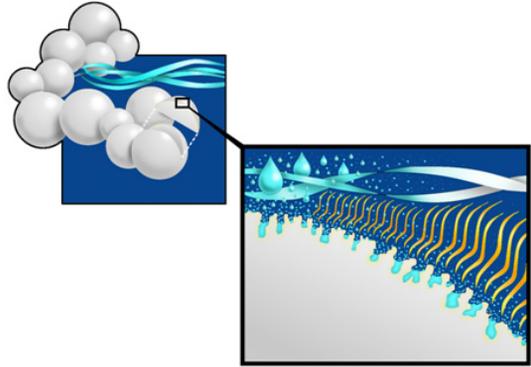


Fig. 4 Magnification of a section showing pores

- 1 단계 - 수증기 분자는 흡착제의 표면과 접촉하면서 흡착이 이루어진다.
- 2 단계 - 수증기 분자는 습도가 높은 영역에서 낮은 영역으로 이동하면서 흡착된다.
- 3 단계 - 흡착제 표면과 접촉하면서 흡착이 이루어진 수증기 분자는 상변화하여 물로 변화한다. 이때 약 695 kcal/kg.wtr의 흡착열이 발생하게 된다.
- 4 단계 - 흡착제의 흡착과정은 포화상태에 이를 때까지 계속되며 다음단계의 흡착을 위해 재생과정을 수행하여야한다.

## 2.2 재생과정(Regeneration)

일정시간 흡착과정을 수행한 흡착제는 다량의 수분을 흡수한 포화상태가 되므로 다음의 공정 수행을 준비하기 위해서 재생과정을 거친다. 재생과정은, 감압과정, 가열과정, 냉각과정, 가압과정의 4단계로 진행되며, 크게 가열과정과 냉각과정으로 구분할 수 있다.

### 2.2.1 가열과정(Heating)

흡착제의 종류에 따라 재생온도와 재생에 필요한 열량은 다르게 되며, 흡착주기, 가열시간, 재생공기의 조건등 관련 조건에 따라 필요한 용

량의 재생 Heater를 설계하게 된다.

일반적인 산업용 Dryer의 운전 Cycle은, 흡착 4 시간, 재생 4 시간의 8 시간주기로 설계되어지며, 재생 4 시간중 가열과정 2~2.5 시간, 냉각과정 1~1.5 시간으로 되어있고, 흡습한 총수분의 약 98%를 가열과정중 대기로 방출시킨다. 표 2는 일반적인 흡착제의 흡착열 및 재생온도를 표시하였다.

재생에 필요한 총열량 산출시 함께 고려해야 할 사항으로 흡착탑(Adsorption Tank), 흡착제의 종류 및 충전량, 복사열에 의한 열손실등이 있으며, 이를 감안한 여유율을 두어야 한다.

가열과정의 재생공기 flow는 흡착탑 상부에서 하부로 흐르는 하향류(downflow)로 하여 재생효율을 높이고, 흡착제로부터 탈착된 수증기 상태 및 응축수 상태의 수분이 효과적으로 배출될 수 있는 구조의 diffuser와 흡착탑 하부의 배관을 구성하여야 한다.

Table 2 Heat of Adsorption & Regeneration Temperature

흡착제	Heat of Adsorption (Kcal/Kg)	Regeneration Temperature (°C)
Activated Alumina	695	150~250
Silica gel	611	100~200
Molecular sieve	1000	200~300

### 2.2.2 냉각과정(Cooling)

가열과정을 완료한 흡착탑과 흡착제는 재생온도와 같은 정도의 높은 온도로 가열되어 있어 흡습이 가능한 상온까지 냉각 시켜야 한다. 흡착탑 및 흡착제를 냉각시키는 과정을 의미하며, 냉각에 필요한 재생공기는 건조한 압축공기를 감압하여 사용하는 것이 효율적이다.

가열재생을 완료한 후에도 흡착탑내에 잔류해 있는 수분을 효과적으로 대기로 방출시키고, 흡착탑 및 흡착제의 온도를 약 60°C 이하로 냉각시키는 과정으로, 냉각용 재생공기의 필요량은 흡착탑내의 가열온도, 냉각시간, 재생공기 흐름

시 흡착탑내의 차압발생의 정도, 재생공기의 조건등에 영향을 받는다.

특히 재생공기의 흐름시 흡착탑내의 차압발생이 커지게 되면 재생효율이 급격히 저하되어 불완전한 재생과정이 발생할 수 있고, 흡착제에 수분이 누적되어 흡착능력을 상실 할 수 있다. 그러므로 흡착탑의 설계시에는 차압발생에 대한 부분을 충분히 고려하여야 한다.

### 2.3. Air Flow

#### 2.3.1 흡착(Drying) flow - 상향류(upflow)

흡입배관으로 유입된 압축공기는 흡입밸브를 통과하고 흡착탑 하부의 diffuser를 통하여 흡착탑내에 충전되어 있는 흡착제층을 균일하게 통과하여 충분한 흡착과정을 거친후 토출배관으로 공급되어진다.

흡착 flow는 일반적으로 흡착탑 하부에서 상부로 흐르는 상향류(upflow) 방식이며, 특수한 경우 흡착탑 상부에서 하부로 흐르는 하향류(downflow) 방식으로 설계도 가능하다. 그림 5에 흡착 flow 및 재생 flow를 도시하였다.

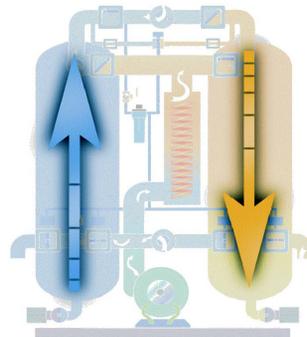


Fig. 5 Air flow (counter flow)

#### 3.2 재생(Regeneration) flow - 하향류(downflow)

재생과정에서의 공기의 흐름은 흡착식 Dryer의 종류에 따라 다를 수 있으나, 일반적인 가열식의 흡착식인 경우 흡착 flow와 반대의 유로를 형성한다.

즉, 일반적인 경우의 흡착 flow가 상향류(upflow) 방식이므로 재생 flow는 대부분 하향류(downflow)로 구성되어 있다.

## 2.4. 흡착탑(Adsorption Tank) 설계시 고려사항

### 2.4.1 흡착제 충전량

흡착에 필요한 흡착제의 충전량을 계산하는 과정은 매우 복잡하고 흡착제 종류 및 크기(grade)에 따라 흡착능력의 차이가 크다. 표 1, 및 그림 3 에서의 흡착능력은 정특성(Static Capacity) 이며, 실제 용량설계는 압축공기의 압력, 온도, 상대습도, 접촉시간등의 특성을 고려한 동특성(dynamic capacity)을 적용한다.

활성알루미늄의 경우 약 10~15 wt-%의 흡습율을 적용하여 설계한다.

### 2.4.2 흡착탑 $\Delta p$

흡착탑내에서의 차압발생은 작을수록 좋으나, 과도한 설계가 될 수 있고, 차압발생이 크게 되면 흡착제의 마모, 분진발생, 불완전한 재생등으로 흡착효율이 저하되어 충분한 제습과정을 수행하지 못하게 된다. 그림 6 에서 흡착제의 크기(grade)별로 사용가능한 차압에 따른 공탑속도값을 제시하였다. 실제 적용에 있어서는 온도, 압력등을 고려한 계산값을 사용한다.

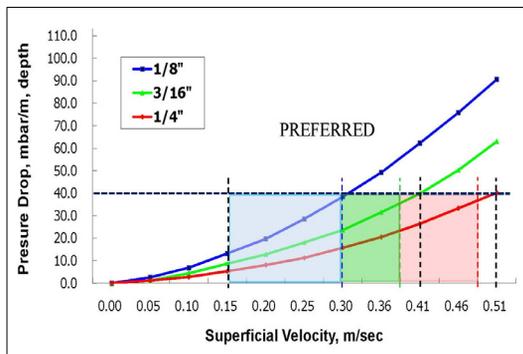


Fig. 6 Pressure Drop vs Superficial Velocity

### 2.4.3 접촉시간(Contact Time)

흡착탑으로 유입된 습한 압축공기를 특수한 diffuser를 통하여 균일한 흐름으로, 일정시간 이상, 흡착제와 접촉하도록 하여, 요구되어지는 이슬점(Dew Point) 상태로 제습하기위한 조건이며, 흡착제의 흡습율을 결정하는 중요한 변수이다.

-40℃ 이하의 이슬점이 요구되어지는 흡착식 Dryer에서는 약 5초 이상의 접촉시간(Contact

Time)이 필요하며, 이에 따라 흡착탑 및 흡착제의 충전량을 결정한다.

### 2.4.4 공탑속도(Superficial Velocity, Empty Velocity)

흡착탑(Adsorption Tank)내에서의 압축공기의 속도는 흡착제의 흡습율, 접촉시간등 흡착탑의 용량을 결정하는 가장 중요한 요인이며, 그림 6 에서 제시한 차압을 기준할 때 흡착제의 크기(grade)에 따라 한계속도를 제한하여 적용한다.

공탑속도가 너무 느리게 설계되어도 균일한 압축공기의 흐름이 형성되기 어렵고 편중된 흐름(Channeling)이 발생할 수 있다. channeling 현상이 발생하면 부분적으로 과흡착영역 및 미흡착영역이 생기게 되어 효율적인 제습효과를 기대할 수 없으며, 경우에 따라서는 흡착제의 조기 노화현상이 발생하기도 한다.

공탑속도가 너무 빠르게 설계되면, 흡착탑내의 차압발생이 커지게 되고, 흡착제의 마모가 심해져 분진발생으로 인한 문제가 발생하고, 상향류(upflow)의 경우 흡착제의 유동화현상(Fluidization, Bubbling)이 발생할 수 있다. 유동화현상이 발생하면, 흡착제의 파손정도가 심해지며, 이때 발생한 분진등으로 인해 Filtering System 이 막히거나하는 또 다른 문제를 야기할 수 있다.

설계조건상 공탑속도의 제약을 받는다면, 가능한 큰 grade의 흡착제를 사용하거나, 압축공기의 흐름을 하향류(downflow)로 검토한다. 그림 7은 압축공기 공탑속도적용에 대한 현상을 그림으로 도시하였다.

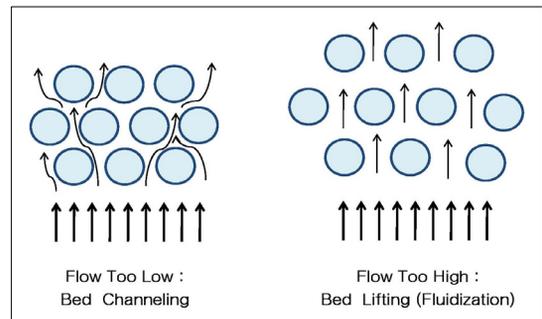


Fig. 7 The Effects of Poor Fluid Dynamics

## 2.5 고공 엔진시험용 Dryer

### 2.5.1 Flow Schematic

고공 엔진시험용 Air Dryer에 대한 구성회로를 그림 8에 간단하게 나타내었다.

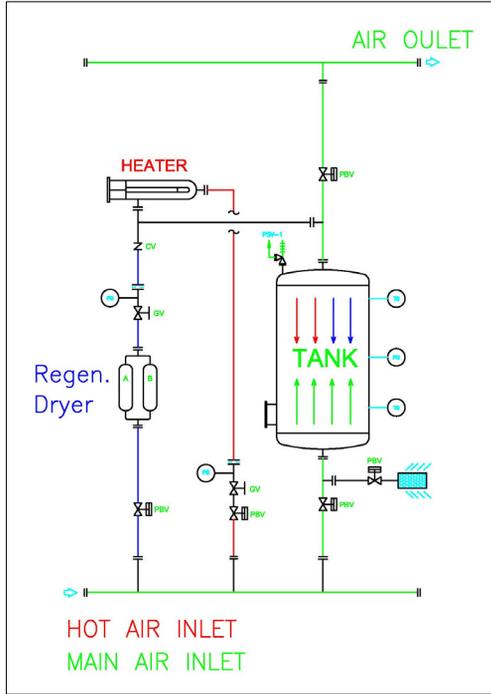


Fig. 8 Flow Schematic

### 2.5.2 흡착 Flow(녹색)

고공 엔진시험용 Air Dryer는 Multi-Tower로 구성하여 각 Test 조건 및 Mode에 대응하도록 설계한다.

1차 After Cooler를 통과한 압축공기가 주흡입 배관으로 유입되어 흡착탑을 통과하면서 제습되어 주토출배관을 통하여 사용처로 보내진다.

### 2.5.3 가열재생 Flow(적색)

일정시간 제습과정을 수행한 흡착탑은 재생과정이 필요하다. 고공 엔진시험용 Air Dryer는 단

속적으로 운전되기 때문에 별도의 재생 Device(Heater, Regeneration Dryer)를 구성하여 운휴시간에 재생과정을 수행한다.

가열재생의 열원으로는 Air Compressor의 압축 열과 전기 Heater를 사용한다. 별도의 Hot Air Line을 구성하지 않고 주흡입배관을 공용으로 사용하여, 약 110℃의 Hot Air를 Electric Heater로 유입시켜 약 230℃로 2차 가열을 한후 흡착탑으로 보내어 가열재생과정을 수행한다. 이때 After Cooler에 냉각수 공급은 차단되며, 주흡입 배관을 제외한 배관 Line 및 흡착탑은 감압하여 재생공기를 대기로 방출시킨다.

### 2.5.4 냉각재생 Flow(청색)

가열재생과정이 완료되면 주흡입배관으로 유입되던 Hot Air의 공급은 중단되고 After Cooler에 공급이 차단되었던 냉각수의 공급이 재개되어 주흡입배관으로 상온상태의 압축공기가 유입된다.

주흡입배관으로 유입된 압축공기는 재생용 Dryer를 거쳐 제습된후 감압과정을 거쳐 흡착탑 상부로 보내진다. 이때도 가열재생과정과 동일하게 주흡입배관을 제외한 배관 Line 및 흡착탑은 감압하여 재생공기를 대기로 방출시킨다.

## 3. 결 론

고공 엔진시험용 Dryer는 일반적인 산업용 제습장치에 비해 적용되는 조건이 매우 상이하고, 용량 또한 대용량이기 때문에 압축공기의 흐름에 대한 제어가 매우 중요하다. 흡착탑 및 압축공기를 균일하게 확산시키는 Diffuser의 설계에 따라 흡착효율의 증대가 기대되며, 단속운전 및 Test Mode에 따른 운전의 특성을 이용한 배관 구성, 압축열 사용등, 운전유지비용 저감을 위한 사항도 System 설계시 고려해야할 사항이다.