

A Study on Operating Method to Save Energy from the Adsorption Dryer in the Process of Purifying Compressed Air

Seok-Wan Kang · Sung-Ho Chang[†] · Hyeon-Joon Kim · Sung-Soo Kim · Yeong-Wook Lee

School of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology

고순도 압축공기 제조시스템의 흡착식 Dryer에서 에너지절감을 위한 운전방법에 관한 연구

강석완 · 장성호[†] · 김현준 · 김성수 · 이영욱

금오공과대학교 산업공학부

Optimizing energy usage for maximum efficiency is an essential goal for manufacturing plants in every industrial manufacturing sector. The generation and distribution of purifying compressed air is a large expense incurred in practically all manufacturing processes. Not only is the generation and treatment expensive equipment of compressed air, but frequent maintenance and effective operation is also required. As a plant's compressed air system is often an integral part of the production process, it needs to be reliable, efficient, and easy to be maintain. In this paper, we study to find operating method to save energy from the adsorption dryer in the process of purifying compressed air, which is required for a clean room production site in "A" company.

The compressed air passes through a pressure vessel with two "towers" filled with a material such as activated alumina, silica gel, molecular sieve or other desiccant material. This desiccant material attracts the water from the compressed air via adsorption. As the water clings to the desiccant, the desiccant particle becomes saturated. Therefore, Adsorption dryer is an extremely significant facility which removes the moisture in the air 70°C below the dew point temperature while using a lot of energy. Also, the energy consumption of the adsorption dryer can be varied by various operating conditions (time, pressure, temperature, etc). Therefore, based on existing operating experiments, we have searched operating condition to maximize energy saving by changing operating conditions of the facility. However, due to a short experiment period (from September to October), further research will be focused on considering seasonality.

Keywords : Compressed Air, Adsorption Dryer, Energy Consumption, Dew Point, Operating Condition

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

압축공기는 14세기부터 동력의 기계화 및 작업성을

향상시키는데 이용되면서 광업이나 건설업 등에 사용되어 왔으며, 화학, 전기, 석유 및 철강분야에서 기술혁신이 진행된 제2차 산업혁명과 더불어 실제로 공압기술이 산업에 적용된 것은 1850년 채광용 증기 드릴, 1880년 공기 브레이크 및 1927년 차량용 자동문 개폐장치 등을 들 수 있다[5]. 특히 반도체, LCD 및 태양전지 등 클린룸을 활용하는 제조현장에서 요구하는 고순도 압축공기를 공급하기 위해서는 초기투자시설로 고순도 압축공기 제조 시스템을 구성하는 것이 일반적이다.

Received 16 August 2016; Finally Revised 22 September 2016;
Accepted 23 September 2016

[†] Corresponding Author : changsh@kumoh.ac.kr

과거 대량생산, 대량소비로 상징되던 개발주도형 시대에는 고순도 압축공기 제조시스템의 구동에너지 측면보다 Air Compressor의 고효율화 및 대용량화에 주력하였던 것이 사실이다. 그러나 저탄소 녹색성장에 대한 대응책으로 소비전력 저감의 시대적 요구에 따라, 제조현장 전체 소비전력의 20~40%를 차지하고 있는 고순도 압축공기 제조시스템의 소비전력을 저감하기 위해서 이미 설치된 고순도 압축공기 제조시스템뿐만 아니라 신설 고순도 압축공기 제조시스템의 에너지 절감에 대한 전문적이고 체계화된 지식이 절실하게 필요하게 되었으며, Air Compressor 제조사들도 소비전력 성능, 대환경성 성능 및 제어성능 등의 기술개발에 전력을 기울이고 있다[2, 3, 5].

지금까지의 에너지 절감은 기존 Air Compressor 제조사에서 권장하는 주요 인자에 대한 개략적인 운전 범위 내에서 압력 및 노점 강하 활동, 압축공기의 누출 방지 및 개선활동, 휴무 및 야간 저 부하 대응 소형 Compressor 적용 등 하드웨어 중심으로 개선활동을 추진했다면[6], 본 연구에서는 냉동식 Dryer와 흡착식 Dryer에 계측용 센서, 유량계 및 전력량계를 포함하는 모니터링 시스템을 구성하여 운전 관점 개선에 주력하였다. 즉 흡착식 Dryer의 주요 인자인 재생 압력, heating 온도 및 재생시간에 대한 최적 조건을 파악하고, 흡착식 Dryer의 운전방식별 최적 인자 구조를 탐색하는 실험을 통해 고순도 압축공기 제조시스템의 흡착식 Dryer에서 에너지절감을 최대로 할 수 있는 운전 조건을 제시하고자 한다[4].

1.2 연구 방법 및 내용

1.2.1 평가특성치의 선정

“A”사의 클린룸 생산현장에서 전기, 증기와 더불어 주요 동력원인 압축공기는 ISO 8573-1의 Class 1이 요구되며, 그 고순도 압축공기의 중요한 품질특성은 청정도, 압력, 습도로써 그러한 항목들이 제조공정에서 요구하는 조건을 충족시켜야 한다. 따라서 고순도 압축공기 제조시스템의 기능이 잘 발휘되는지를 평가, 판정하는 것은 만들어진 압축공기의 청정도, 압력, 습도를 측정, 평가하는 것이 타당한 것으로 보인다. 그러나 그런 항목들은 공정에서 요구하는 최소한의 조건만 갖추면 되므로 합격, 불합격 또는 좋다, 나쁘다는 이분법적인 평가, 판정을 하기 때문에 고순도 압축공기 제조시스템의 근본적인 기능을 제대로 평가할 수가 없다. 고순도 압축공기 제조시스템은 전기라는 입력에너지를 사용해서 공기의 상태를 바꾸는 것이며, 전기에너지를 공기의 상태변화라는 결과물로 얼마나 잘 변환하느냐를 평가, 판정하는 것이 타당한 방법이다. 따라서 본 연구에서는 공기의 상태변화에 대한 고순도 압축공기 제조시스템의 전기에너지 사용량을 평가특성으로 선정했다.

1.2.2 시료 및 실험 조건

본 연구는 생산을 수행중인 제조공정에 고순도 압축공기를 공급하는 고순도 압축공기 제조시스템을 대상으로 조건을 변경하면서 실험을 실시하였다. 따라서 그 시료는 측정, 평가를 하고 난 후에 버리는 것이 아니고 제품을 생산하는 제조공정에 그대로 공급을 하는 것이었다. 즉, 조건을 바꾸면서 실험을 하더라도 시료로써 만들어지는 압축공기는 모두 공정에서 요구하는 조건을 맞추어야 하므로 정상적으로 조업이 이루어지는 상태에서, 제조에 공급하는 고순도 압축공기를 시료로 사용했다. 그러한 고순도 압축공기에 대해서 제품을 생산하는 제조공정에서 요구하는 품질을 충족시키는 전제하에 흡착식 Dryer에서 주요 제어인자들을 변경시키면서 전력 사용량과 purge량을 측정하여, 재생 에너지 비용관점 최적의 운전조건을 찾기 위해 다음과 같은 방법으로 연구를 진행하였다.

주요인자 실험을 통해 도출된 인자를 기준으로 Time 운전과 노점 운전에서의 Delay Time 적용, Delay Time과 PSR(Purge Stop Regeneration)을 적용한 실증실험을 통해 heating 시 사용되는 소비전력과 heating과 cooling시 소모되는 purge량을 감안한 연간 재생비용 측면 비교분석을 통하여 최소의 에너지로 공정에서 요구하는 조건을 갖춘 고순도 압축공기를 제조할 수 있는 운전조건을 탐구하였다.

2. 연구 방법

2.1 흡착식 Dryer의 주요 인자

2.1.1 재생 압력

재생 압력이 3.5 bar 이상은 노점온도(-80℃)의 관리 품질에는 영향이 없으나 높은 압력으로 인한 흡착 겔의 파손이 우려되고, 재생 압력 2.5 bar 이하에서는 흡착 겔의 수분을 충분히 건조 증발시키지 못하여, 재생 후 노점온도(-80℃) 관리범위 이상이 되어 제조 생산 공정 품질에 영향을 미치게 한다.

2.1.2 Heating 온도

재생 시 관리되는 전기 heater 온도는 흡착제 겔의 재생 가능온도 315℃까지 상승 가능하나, purge 밸브의 packing 류 안전온도는 230℃까지 가능하므로 시스템의 설계시의 안정성을 고려하여 보통 210~220℃로 설정하여 운전한다. 현재 “A”사에 설치되어 있는 흡착식 Dryer의 전기 heater 사양은 다음과 같다. 전기 heater 전원은 3상 380V, heater 용량은 54kW, heater 발열량은 46,440 kcal/h(1kW-860kcal)이다.

2.1.3 재생시간

재생 tower의 재생시간은 heating과 cooling 시간으로 구분할 수 있으며, heating 시간과 cooling 시간은 각각 5~12hr을 설정할 수 있으며 공급 노점의 상태에 따라서 시간을 가감 선택하여 운전한다. 재생시간의 설정은 흡착식 Dryer의 노점온도 공급 품질에 가장 큰 영향을 주며, 고순도 압축공기 제조시스템에서 Compressor 다음으로 전력에너지가 소비되므로 재생시간의 단축이 요구된다.

2.2 흡착식 Dryer의 주요 운전 방식

흡착식 Dryer의 운전방식은 크게 Time 운전과 노점 운전으로 구분할 수 있으며, 노점 운전에서는 품질 대응을 위해 Delay Time 적용을 해왔고 추가적으로 재생시간 단축을 통한 에너지 절감을 위해 Delay Time과 PSR을 적용하게 되었다. 흡착식 Dryer는 보통 2개의 흡착제(Desiccant) tower를 갖고, 흡착(공급)과 탈착(재생)을 교대로 반복하면서 수행하는데, 흡착과 재생을 하는 시간을 어떻게 적용하느냐에 따라 고순도 압축공기(Clean Dryer Air)의 품질과 그 시스템을 운영하는 데 소비되는 전기에너지의 양이 크게 영향을 받는다.

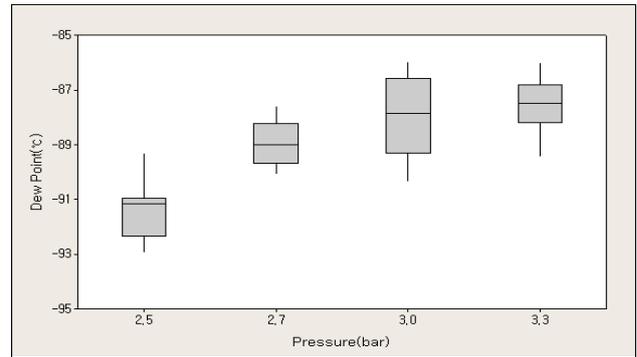
3. 결과 및 고찰

3.1 Time 운전에 대한 실험 결과

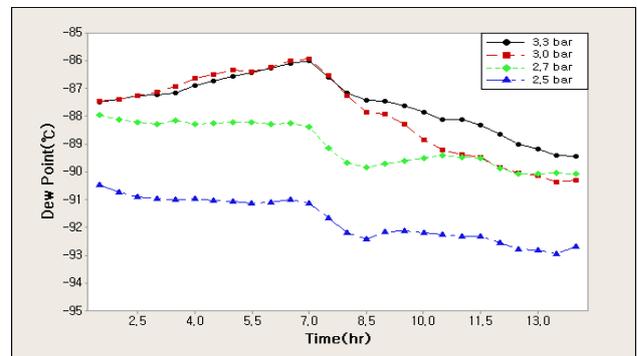
현장 실험에서는 모든 인자를 가변시켜 볼 수가 없고, 가능한 인자도 한정된 범위에서만 가변시켜 볼 수 있다. 따라서 조절에 많은 제약조건이 따르고, 설정을 변경했을 때 실제 적용된 값이 설정된 값대로 되는 데 많은 시간이 소요되는 재생 압력과 heating 온도를 사전 실험과 관찰을 통해서 최적의 단일 값을 찾기로 하였다.

3.1.1 재생 압력 변경 실험

재생 압력과 heating 온도의 최적 조건을 찾아보기 위해서 먼저 재생 압력을 변경시켜 보았는데, 이 때 재생 14hr(Heating 7hr, Cooling 7hr), heating 온도는 210~220℃로 “A”사의 기본 운전 조건으로 설정했다. 설비의 사용 재생 압력은 3.3 bar를 기본 조건으로 해서 추가 세가지의 조건 3.0 bar, 2.7 bar, 2.5 bar로 실험을 실시했다. 그 결과는 아래의 <Figure 1>, <Figure 2>와 같이 총 4가지 조건 모두가 공정에 맞추어줘야 할 노점온도를 충족하였다.



<Figure 1> Dew Point Temperature by Pressure

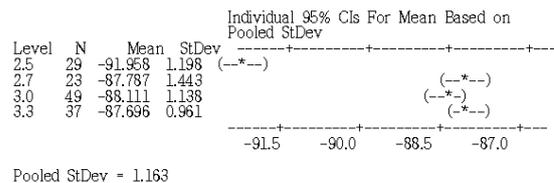


<Figure 2> Dew Point Temperature by Pressure

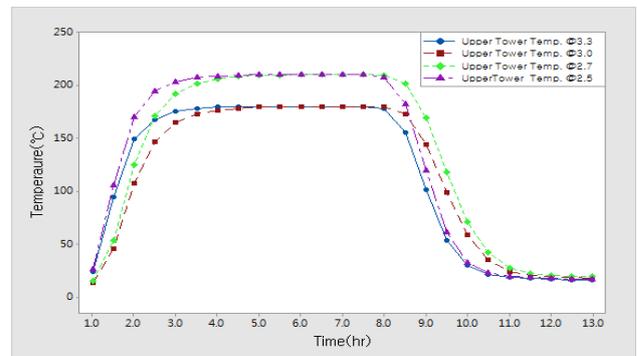
One-way ANOVA: Dew Point versus Pressure

Source	DF	SS	MS	F	P
Pressure	3	380.95	126.98	93.83	0.000
Error	134	181.35	1.35		
Total	137	562.30			

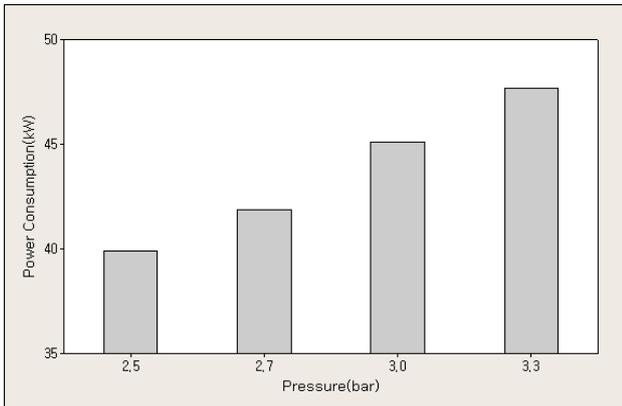
S = 1.163 R-Sq = 67.75% R-Sq(adj) = 67.03%



<Figure 3> One-way ANOVA : Dew Point Versus Pressure



<Figure 4> Upper Tower Temperature Purge Volume by Pressure



<Figure 5> Power Consumption by Pressure

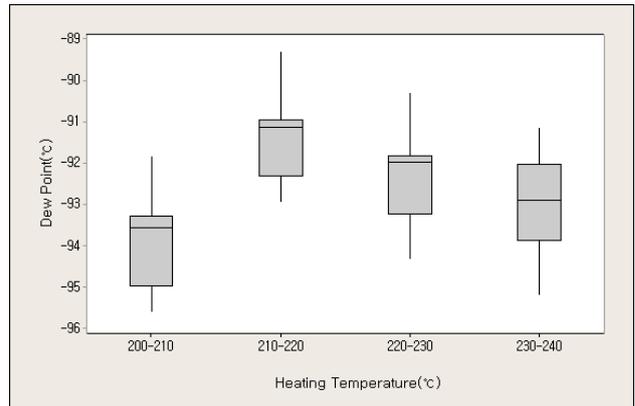
한편, 재생 압력이 낮은 2.5 bar에서 노점온도가 더 좋은 이유는 <Figure 4>에서 보는 바와 같이 재생 tower 상부의 높은 온도의 영향을 받았고, 낮은 압력으로 인해서 공기의 유속이 상대적으로 느려서 기공 속에 있는 수분도 잘 걷어가는 효과가 있어서 재생 압력이 낮은 2.5 bar에서 가장 좋았을 것으로 예상된다. 재생 압력별 소비전력 측면에서 보면 <Figure 5>에서 보는 바와 같이 2.5 bar일 때 소비전력이 가장 낮은 것으로 확인 되었다.

3.1.2 Heating 온도 변경 실험

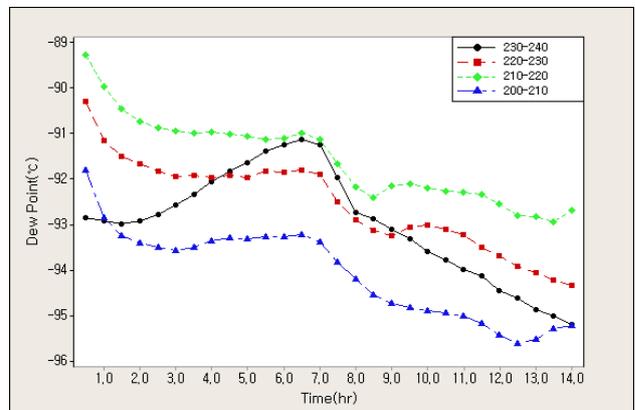
Heating 온도는 210~220℃, 재생 14hr(Heating 7hr, Cooling 7hr) 및 앞서 실험결과에서 도출된 2.5 bar를 기본 조건으로 추가 세 가지의 조건 200~210℃, 220~230℃, 230~240℃의 구간별로 실험을 실시하였으며, heating 온도의 최적 조건을 찾아보기 위해서 노점온도, purge 온도, purge 량 및 전력 사용량 등을 확인해 보았다.

Heating 온도별 실험 결과, <Figure 6>과 <Figure 7>에서 보는 바와 같이 가장 낮은 heating 온도인 200~210℃에서 노점이 가장 좋았으며, 그 이외의 tower 상부 온도, purge 온도, heating 온도, cooling 온도, purge 량 등은 <Figure 9>~<Figure 13>에서 보는 바와 같이 크게 유의차가 없는 것으로 나타났다.

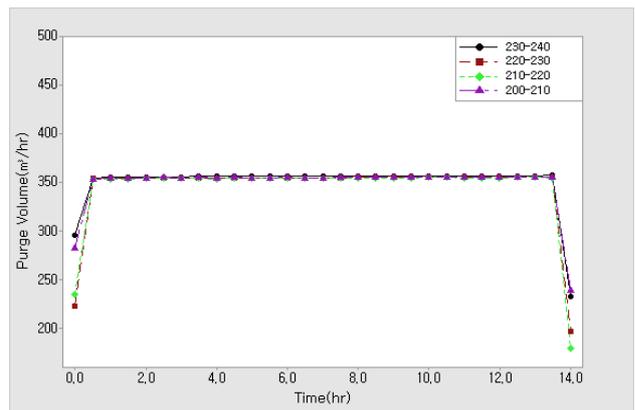
Heating 온도가 가장 낮은 200~210℃에서 노점이 가장 좋게 나타나는 이유를 밝히기 위해서 다른 영향인자를 조사해 보았는데, 가장 높은 온도인 230~240℃와 가장 낮은 온도인 200~210℃의 tower 상부온도가 215℃와 180℃, purge 온도가 110℃와 97℃, heating 구간의 온도가 228℃와 208℃로 대략 13~35℃의 차이가 난다. 이와 같이 온도측면에서 차이가 나는데도 불구하고 가장 낮은 온도인 200~210℃의 노점이 가장 좋은 이유는 온도가 높을수록 좋은 것이 아니고, 어느 일정한 최소한의 온도를 넘으면 온도에 의한 효과는 유의한 차이가 없기 때문



<Figure 6> Dew Point by Heating Temperature

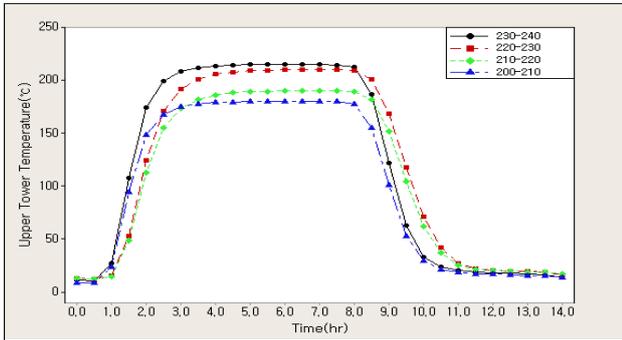


<Figure 7> Dew Point by Heating Temperature

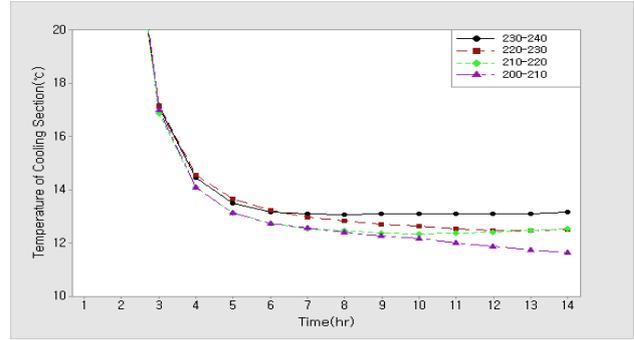


<Figure 8> Purge Volume by Heating Temperature

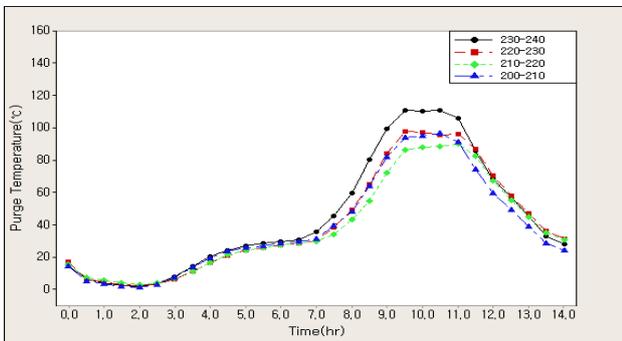
인 것으로 보인다. 즉, 온도는 인자의 임계치를 넘으면 그에 의한 효과는 유의한 차이가 없고, 흡착식 Dryer의 구조나 gel의 특성에 가장 잘 작용하는 압력이라는 인자의 최적값이 존재한다고 볼 수 있으며, 이번 실험의 경우에 실험한 압력들 중에서는 2.5 bar가 가장 효과가 크다고 볼 수 있다.



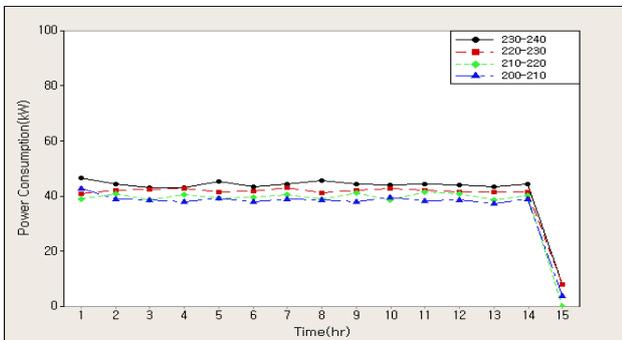
<Figure 9> Upper Tower Temperature by Heating Temperature



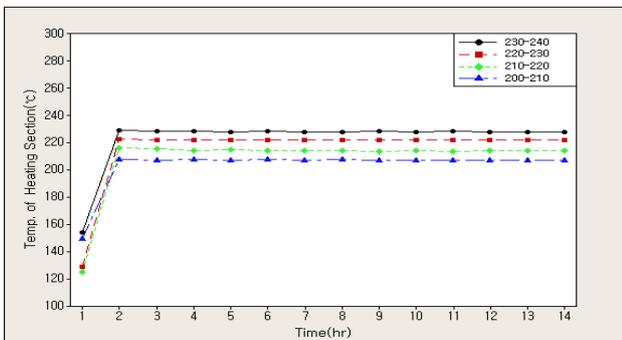
<Figure 13> Temperature Trend of Cooling Section by Heating Temperature



<Figure 10> Purge Temperature by Heating Temperature



<Figure 11> Power Consumption by Heating Temperature

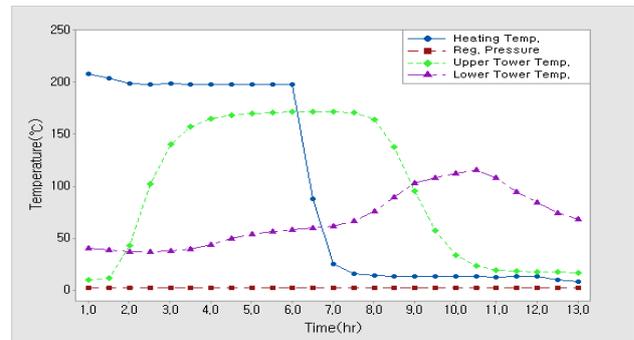


<Figure 12> Temperature of Heating Section by Heating Temperature

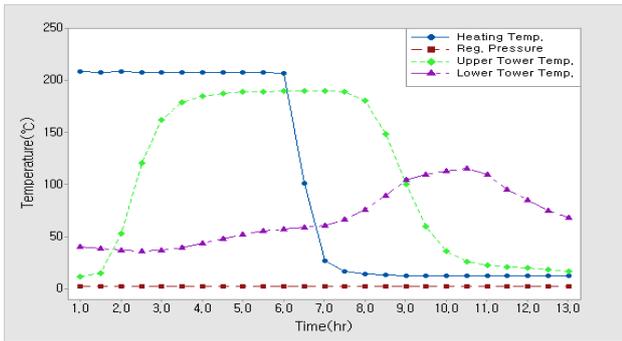
3.1.3 Time 운전 실험

지금까지 실험을 통해서 확인된 재생 압력과 heating 온도의 최적 조건, 즉 2.5 bar와 200~210°C의 조건에서 재생 공정의 heating 시간과 cooling 시간을 가변시켜서 시스템 작동 상태를 보기로 하였다.

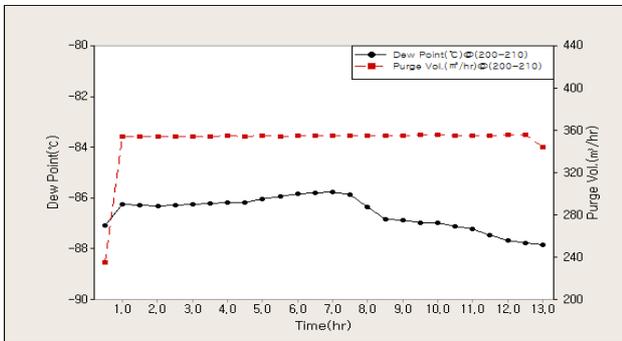
먼저 재생 12hr(Heating 6hr, Cooling 6hr)으로 실험을 해 본 결과, 설정한 재생시간이 모두 경과되면 시스템이 tower 하부 온도를 점검하며, 이 때 tower 하부 온도가 60°C 이상일 경우에는 재생을 지속하고, purge는 계속 발생한다. 그러다가 tower 하부온도가 60°C 이하로 확인 되었을 때, 공급과 재생 tower가 교체된다. 하지만 재생시간을 12hr으로 운전한 결과, <Figure 14>~<Figure 17>과 같이 heating 온도, tower 상부 온도 및 purge량 등은 정상적인 상태였으나, <Table 1>에서 보는 바와 같이 주어진 재생시간 이내에 tower 하부 온도가 60°C에 도달하지 않았으며, 추가 재생 시간 18min 이후에 tower가 교체 진행 되었다. 그래서 동일 조건에서 heating 온도를 210~220°C로 올려서 추가 실험을 진행해 보았으나, 이 역시 <Table 2>에서 보는 바와 같이 주어진 재생시간 보다 12min 지연되어 tower 하부 온도가 60°C에 도달함에 따라 재생 12hr의 경우에는 Time 운전방식에서 제외하기로 하였다.



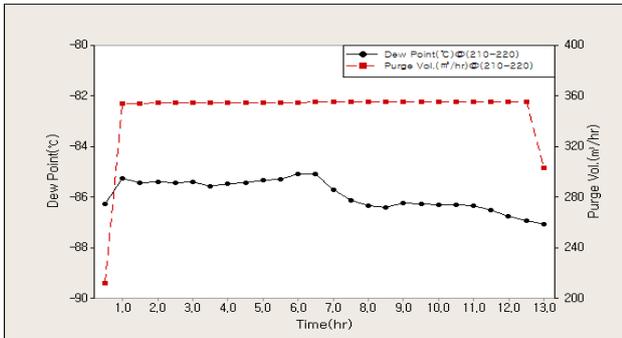
<Figure 14> System Performance @H6_C6(Heating Temperature 200~210°C)



<Figure 15> System Performance @H6_C6(Heating Temperature 210~220°C)



<Figure 16> Dew Point Purge vol. Trend @H6_C6(Heating Temperature 200~210°C)



<Figure 17> Dew Point Purge vol. Trend @H6_C6(Heating Temperature 210~220°C)

<Table 1> Purge Temperature at 200~210°C, H6_C6

Regeneration Time (hr)	Lower Tower Temp. (°C)	Purge Temp. (°C)
12hr	68.2	38.28
12hr 6min	66.4	36.41
12hr 12min	64.3	34.35
12hr 18min	62.6	32.64
12hr 24min	59.5	30.58

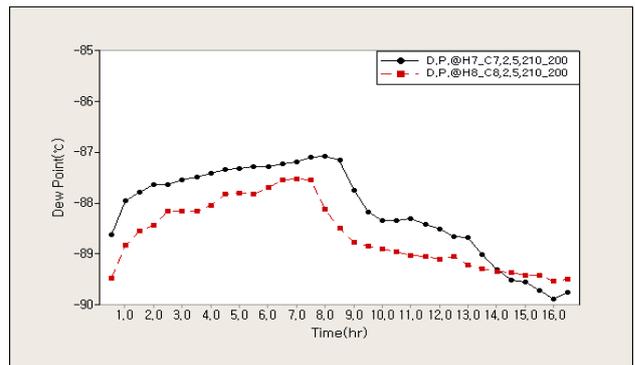
※ Lower Tower Temp. is assumed to be 30°C higher than Purge Temp.

<Table 2> Purge Temperature at 210~220°C, H6_C6

Regeneration Time (hr)	Lower Tower Temp. (°C)	Purge Temp. (°C)
12hr	67.36	37.36
12hr 6min	65.45	35.45
12hr 12min	63.86	33.86
12hr 18min	59.80	31.97

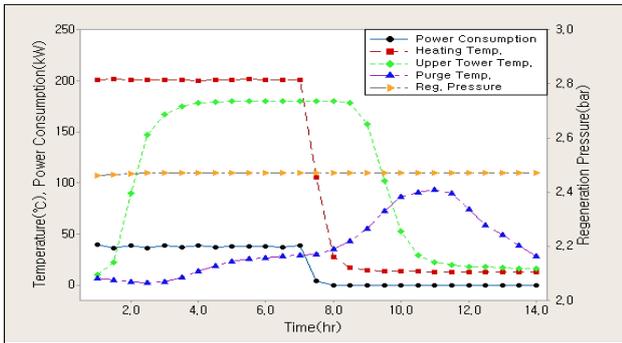
※ Lower Tower Temp. is assumed to be 30°C higher than Purge Temp.

다음으로 재생 14hr(Heating 7hr, Cooling 7hr)과 재생 16hr(Heating 8hr, Cooling 8hr)로 실험을 해본 결과, 노점 온도의 추이는 <Figure 18>에서 보는 바와 같이 정상적으로 요구 규격을 유지하고 있었으며, 또한 tower 하부 온도가 재생완료 판단 기준온도인 60°C에 도달했는지 점검했을 때, 정상적으로 도달하여서 잠금이 걸리지 않았고, 시스템도 안정적인 상태를 유지하였다.

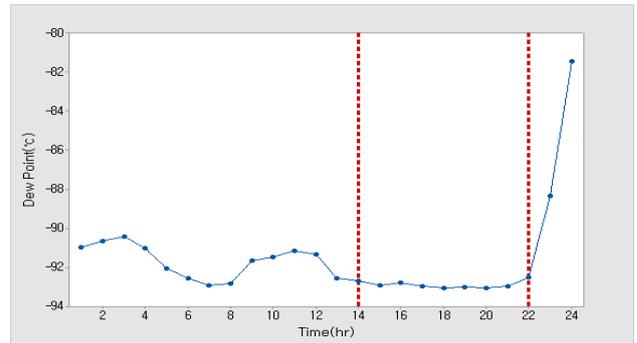


<Figure 18> Dew Point by Regeneration Time(14hr, 16hr)

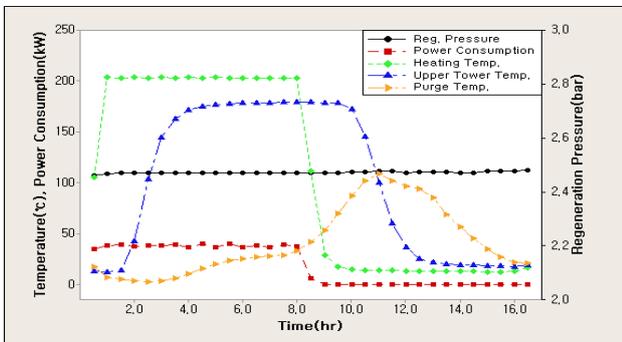
Time 운전(재생 14hr : Heating 7hr, Cooling 7hr, 재생 16hr : Heating 8hr, Cooling 8hr)의 실험결과를 요약하면, 노점은 재생시간이 긴 16hr 재생 조건이 다소 좋게 나타났으며, 소비전력 측면에서는 두 조건 모두 거의 차이가 없는 것으로 확인 되었다. 다만 두 조건의 차이는 재생시간이 다름에 따라 tower 교체 횟수가 차이가 난다는 것이다. 즉, 재생 16hr의 교체 cycle time이 재생 14hr의 cycle time보다 길기 때문에 동일한 시간 내에 교체 횟수는 재생 16hr(연간 548회)의 경우가 재생 14hr(연간 626회)의 경우보다 적다. 이는 기계적인 Stress나 관리노력의 측면에서 볼 때, 재생 16hr의 조건이 재생 14hr보다 유리하다는 것이다. 하지만 재생시간이 길어짐에 따라 purge량이 증가하며, 전체 에너지 사용량 관점에서는 크게 차이는 없지만 재생 14hr(Heating 7hr, Cooling 7hr)일 때 연간 재생비용이 가장 낮은 것으로 확인 되었으며, 이를 Time 운전방식으로 선정하였다.



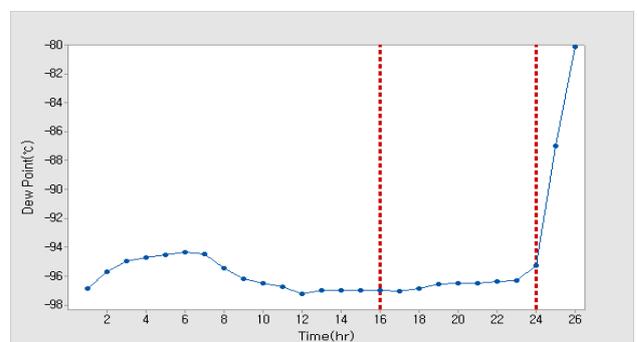
<Figure 19> System Performance @H7_C7(Heating Temperature 200~210℃)



<Figure 21> Dew Point of Dew Point Operation @H7_C7, 200~210, 2.5 bar



<Figure 20> System Performance @H8_C8(Heating Temperature 200~210℃)



<Figure 22> Dew Point of Dew Point Operation @H8_C8, 200~210, 2.5 bar

3.2 노점 운전에 대한 실험 결과

3.2.1 노점 운전 실험

다음은 Time 운전 대비 에너지 절감을 위해서 tower 교체 조건을 노점온도(-80℃)로 설정하여, 설정된 노점온도가 될 때까지 공급하는 방식인 노점 운전을 통해서 노점 온도 유지의 한계점을 확인해보기로 했다. 그래서 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 200~210℃의 공통조건에서 재생 14hr(Heating 7hr, Cooling 7hr)과 재생 16hr(Heating 8hr, Cooling 8hr)의 두 가지 조건에 대한 실험을 실시하였다. 공급을 시작했을 때부터 일정 시간 경과시점까지는 노점이 일정하게 유지되다가(재생 14hr의 경우 22hr, 재생 16hr의 경우 24hr) <Figure 21>~<Figure 22>에서 어느 순간에 급격하게 노점이 상승하여 2hr 내에 설정된 노점온도에 도달하는 특성을 보였다. 따라서 급격하게 노점상승을 보이는 시간을 확인하고, 이러한 특성을 반영하여 그에 따른 정확한 교체시점을 설정해야 한다. 이번 실험에서는 노점 운전에서 공급 가능시간의 한계에 대한 확인의 의미(재생 14hr의 경우 최대 24hr 공급 가능, 재생 16hr의 경우 최대 26hr 공급 가능)가 있으며, 각각의 공급시간과 재생 시간 및 공급 품질 안정성을 고려해서 Delay Time은 8hr으로 실험하기로 하였다.

3.2.2 Delay Time 적용 실험

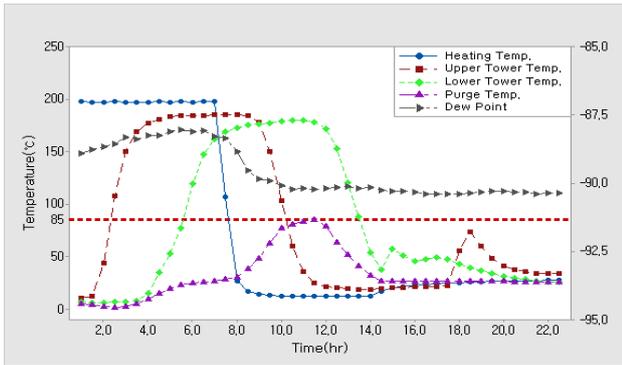
Delay Time은 노점 운전에서 노점 센서 문제 등으로 설정된 노점온도 (-80℃) 이상으로 공급되는 품질문제를 방지하기 위한 안전장치로 적용한 것이다. 실험시간을 단축하고자 Delay Time 적용 실험을 진행하면서, 동시에 PSR 실험을 병행하여 다음 조건 즉, 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 200~210℃, 재생 14hr(Heating 7hr, Cooling 7hr), Delay Time 8hr(공급 22hr), purge 온도, heating 100℃, cooling 20℃로 실험을 한 결과, <Figure 23>과 같이 공급노점은 규격을 만족하였으나, purge 온도가 heating시 최대 85℃로 낮았기 때문에 purge 온도를 변동시켜 추가 실험을 실시하였다.

두 번째로 동일 조건에서 purge 온도를 heating 80℃, cooling 30℃로 실험을 한 결과, <Figure 24>에서 보는 바와 같이 공급노점은 만족하였으나, purge 온도를 확인해 보았을 때, 다른 실험조건에 비해서 purge 온도가 heating시 최대 55℃로 많이 낮았다. 그래서 purge 온도가 낮은 원인이 22hr 공급을 했을 때 22hr 동안 흡수되는 많은 수분을 재생 14hr 내에 모두 건조시키기에는 시간이 짧은 것으로 판단되었다. 이러한 운전을 계속 실시할 경우, 불완전한 건조 상태가 누적되면서 결국에는 공급노점에 이

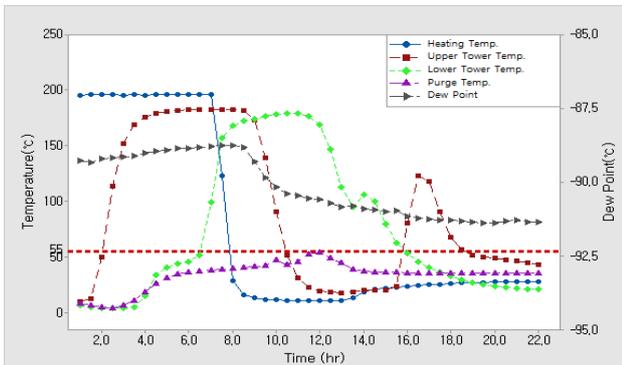
상이 발생할 가능성이 있다. 이러한 예상되는 문제를 해결하는 방법으로 재생 압력 및 heating 온도를 변화시켜서 해결할 수도 있으나, 재생 압력과 heating 온도는 에너지 소비를 절약할 수 있는 조건으로 고정하기로 했기 때문에 먼저 heating 시간과 cooling 시간을 변화시켜서 해

결방안을 찾기로 하였다.

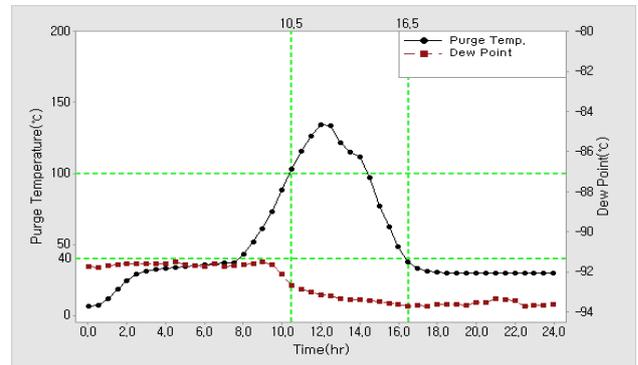
앞에서 노점 운전 실험 시 공급 가능한 최대시간이 24hr로 확인되었는데, Time 운전을 통하여 기준 purge 온도를 만족하는 재생시간을 찾기 위한 실험을 추가로 실시하였다. 실험 방법은 실제로 운전을 하면서 heating시 purge 온도가 설정 기준값에 도달하면 heating을 종료시키고, cooling시 purge 온도가 설정 기준값에 도달하면 cooling을 종료시킨다. 따라서 설정한 재생시간인 24hr보다 실제 재생시간을 얼마나 짧게 할 수 있는지 확인실험을 하였다. 실험 결과, 노점은 <Figure 26>과 같이 규격(-80℃ 이하)을 만족하며, purge 온도에 있어서 재생 24hr의 경우에는 heating시 10.5hr 만에 종료되어서 1.5hr 단축되었고, cooling시 6hr 만에 종료되어 6hr 단축되었다. 따라서 총 7.5hr 단축되었다. 추가로 최대 공급 가능시간 28hr에 대해서 실험한 결과, heating 시 12.7hr 만에 종료되어서 1.3hr 단축되었고, cooling 시 5.5hr 만에 종료되어 8.5hr 단축되었으며 총 9.8hr 단축되었다. 따라서 이 실험을 통해 PSR 적용 실험 시 공급시간은 24hr으로 설정하고, 재생시간은 16.5hr 전후로 종료된다는 것을 확인하였다.



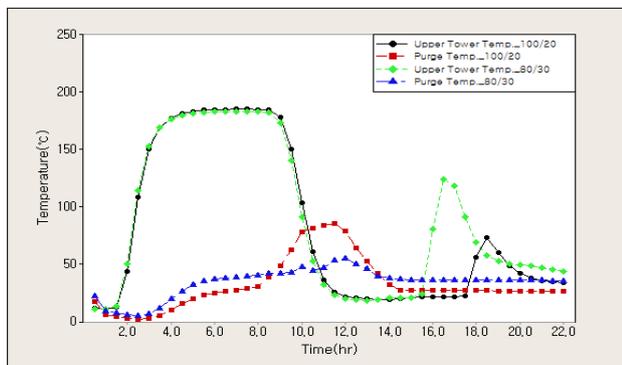
<Figure 23> Temperature of Regeneration, Upper Tower, Lower Tower, Purge, & D.P. @ H. Purge Temperature 100°C, C. Purge Temperature 20°C



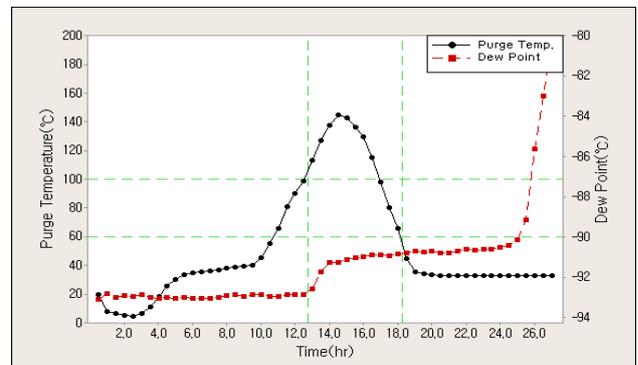
<Figure 24> Temperature of Regeneration, Upper Tower, Lower Tower, Purge, & D.P. @ H. Purge Temperature 80°C, C. Purge Temperature 30°C



<Figure 26> Dew Point, Purge Temperature @ H12, C12 Operation, Lower Purge Temperature 100/40



<Figure 25> Upper Tower, Purge Temperature by Purge Temperature Constraints

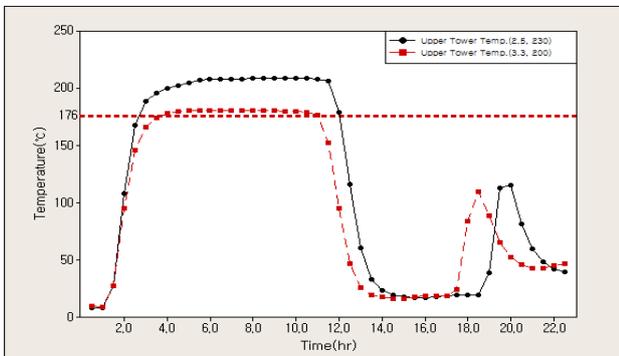


<Figure 27> Dew Point, Purge Temperature @ H14, C14 Operation, Lower Purge Temperature 100/60

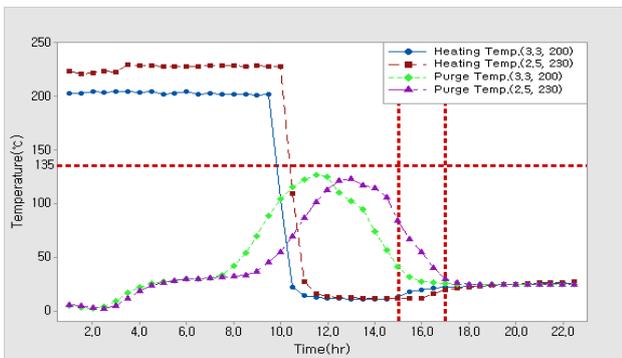
실험에서 도출된 재생 시간 조건에서 재생 압력과 heating 온도를 변화시키는 Delay Time 적용 실험을 실시해 보았다. 재생 16hr(Heating 10hr, Cooling 6hr), Delay Time 6hr(공급 22hr), purge 온도는 heating 시 100℃, cooling 시 40℃의 동일 조건에서 재생 압력 3.3 bar, heating 온도 200~210℃와 재생 압력 2.5 bar에 heating 온도 230~240℃의 두 가지 조건으로 실험을 실시한 결과, tower 상부온도는 <Figure 28>에서 보는 바와 같이 재생 압력 3.3 bar, heating 온도 200~210℃와 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 230~240℃의 두 가지 조건에서 모두 현재의 양산공정에 공급하는 조건인 176℃를 만족하고 있다.

Purge 온도는 <Figure 29>에서 보는 바와 같이 재생 압력 3.3 bar, heating 온도 200~210℃ 조건은 재생 시작 후 15hr 정도 경과 후에 40℃ 이하로 냉각되었으며, 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 230~240℃ 조건은 재생 시작 후 17hr 경과 후에 40℃ 이하로 냉각되었다. 이는 두 조건 모두 17hr 이후에는 언제든지 tower 교체를 할 수 있는 상태가 되어서 공급 22hr으로 운영하는 기준에 부합되는 상태를 보이고 있으나, 재생을 완료할 수 있는 조건에 도달하는 것은 재생 압력 3.3 bar, heating 온도 200~210℃ 조건이 더 빠르다.

Tower 하부온도는 재생 압력 3.3 bar, heating 온도 200~

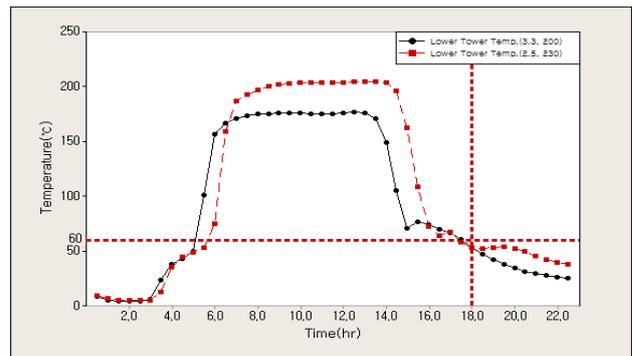


<Figure 28> Upper Tower Temperature Trend by Pressure



<Figure 29> Heating Temperature Purge Temperature by Pressure

210℃와 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 230~240℃의 두 가지 조건에서 모두 재생 시작 후 18hr이 경과한 후부터 60℃ 이하로 냉각되었다. 이는 purge 온도의 상태와 마찬가지로 18hr 이후에는 언제든지 tower 교체를 할 수 있는 상태가 되어서 공급 22hr으로 운영하는 기준에 부합되는 상태를 보이고 있다. 따라서 tower 상부온도, heating 온도, purge 온도, tower 하부온도 4가지를 종합해서 볼 때, tower를 교체할 수 있는 조건은 공급 22hr을 적용할 수 있는 조건은 모두 갖추고 있다고 판단된다. 하지만, 공급 품질은 만족하는 조건에서 연간 전체 에너지 사용량 관점에서는 <Table 3>에서 보는 바와 같이 실험조건 재생 16hr(Heating 10hr, Cooling 6hr), 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 230~240℃, Delay Time 6hr(공급 22hr), purge 온도는 heating시 100℃, cooling시 40℃일 때 연간 재생 비용이 가장 낮은 것으로 확인 되었다.



<Figure 30> Lower Tower Temperature by Pressure

<Table 3> Energy Expense by Delay Time Application Test

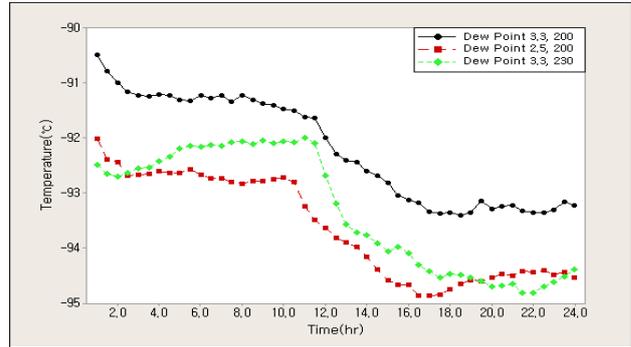
		Condition 1		Condition 2	
Operation Condition	Supply Time	22hr		22hr	
	Regeneration Time	16hr (Heating 10, Cooling 6)		16hr (Heating 10, Cooling 6)	
	Delay Time	6hr		6hr	
	Regeneration Pressure	3.3 bar		2.5 bar	
	Heating Temp.	200~210℃		230~240℃	
Operation Results	Purge Temp.	Heating 100℃, Cooling 40℃		Heating 100℃, Cooling 40℃	
	Regeneration Time	Heating 9hr 30min	Cooling 5hr 10min	Heating 10hr	Cooling 6hr
	Time saving/Regeneration	30min	50min	None	None
	Energy Consumption/Regeneration	450kWh, 6506m ³		451kWh, 5787m ³	
Energy Cost/Regeneration		123,037 won		114,587 won	
Annual number of Regeneration		398		398	
Annual Total Regeneration Cost		48,991,222 won		45,626,415 won	

3.2.3 Delay Time & PSR 적용 실험

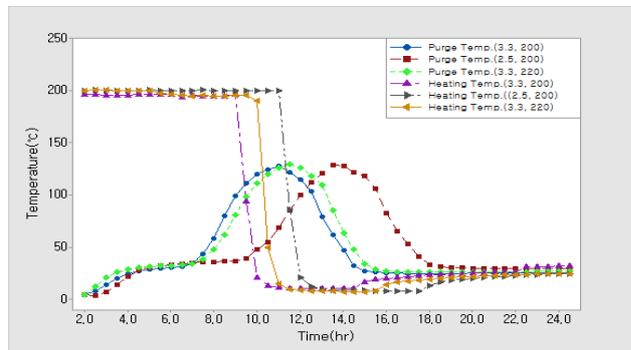
노점 운전에서 Delay Time을 적용한 실험은 공급시간을 최대한 확대할 수 있는 시간이 어느 정도 되는지를 확인하기 위한 실험이라고 할 수 있는데, 기본적으로 재생이 완료되면 tower를 교체할 준비는 완료된 상태이나, 공급중인 tower의 노점이 아직 수요 측의 요구수준을 만족시키고 있는 상태라면 공급중인 tower를 계속 가동시켜서 한 번 재생한 결과를 더 길게 활용하는 운전이라고 할 수 있다. 이렇게 함으로써 가능한 한 적은 에너지로 재생을 실시하고, 일단 재생된 것을 최대한 길게 사용함으로써 에너지의 사용효율을 극대화하는 운전방식이다. 이를 위해서 공급 품질은 만족하면서 에너지 비용을 최소화 할 수 있는 Delay Time & PSR 적용 실험의 기본 조건은 재생시간 22hr(Heating 11hr, Cooling 11hr), Delay Time 2hr(공급시간 24hr), purge 온도 heating 100℃, cooling 30℃로 설정 후, 재생 압력과 heating 온도를 변화시키면서 최적의 조건을 탐색하였다.

<Figure 34>와 같이 이번 실험을 실시한 고순도 압축 공기 제조시스템의 경우, 공급으로 교체된 직후에 공급되는 tower 상부에서 토출되는 공기의 온도가 약간 높더라도 냉동식 Dryer의 기능에 유의한 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 앞서 기술한 3가지 Delay Time & PSR 적용 실험조건으로 재생 압력 3.3 bar, heating 온도 200~210℃, 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 200~210℃, 재생 압력 3.3bar, heating 온도 220~230℃로 실험을 한 결과, <Figure 32>~<Figure 34>에서 보는 바와 같이 노점온도, heating 온도, purge 온도 및 purge량 등은 3가지 조건 모두 공급 조건을 충족시키는 것으로 확인 되었으며, 연간 전체 에너지 사용량 관점에서는 조건(재생 22hr (Heating 11hr, Cooling 11hr), 재생압력 2.5 bar, heating 온도 200~210℃, Delay Time 2hr(공급 24hr), purge 온도 (heating 100℃, cooling 30℃)일 때 연간 재생 비용이 가장 낮은 것으로 확인 되었다.

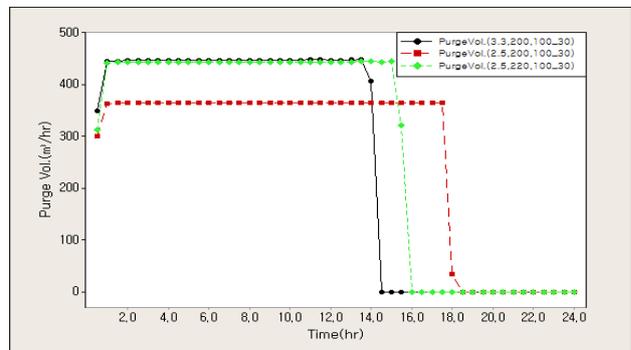
이번 실험을 요약하면, 흡착식 Dryer의 최적 운전방식을 설정하기 위하여 먼저 현재 “A”사에서 운영 중인 기본 조건에서 재생 압력과 heating 온도별 실험을 통해 최적 인자(재생 압력 2.5 bar, heating 온도 200~210℃)를 도출 하였으며, 이를 통해 Time 운전에서의 공급 시간별 최적 운전 조건을 설정(재생 14hr : Heating 7hr, Cooling 7hr)하였다. 그 다음으로 노점 운전에서는 먼저 노점 운전 실험을 통해 최대 공급 가능시간(24~26hr)과 Delay Time(8hr)을 확인 할 수 있었다. 또한, PSR 조건 설정 실험을 실시하여 최대 공급시간(24hr) 기준, heating과 cooling시 purge 온도를 만족하는 재생시간(약 16.5hr)을 찾았으며, Delay Time 적용 실험의 최적 운전 조건을 설정(재생 16hr : Heating 10hr, Cooling 6hr, Delay Time 6hr, 재생 압력 2.5 bar,



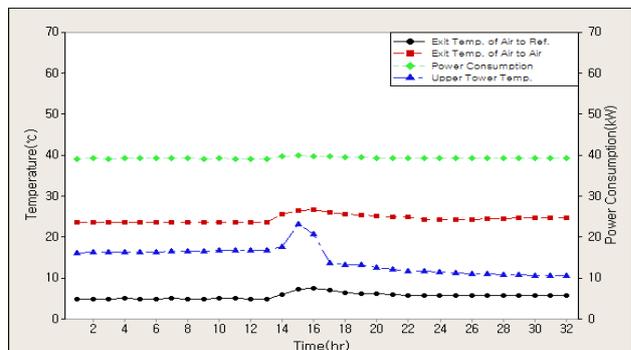
<Figure 31> Dew Point of PSR Test



<Figure 32> Heating, Purge Temperature of PSR Test



<Figure 33> Purge Volume of PSR Test



<Figure 34> Exit Temperature to Refrigerator from Upper Tower Temperature of Adsorption Dryer

heating 온도 230~240℃) 하였으며, Time 운전 대비 에너지 사용량이 절감되는 것을 확인하였다. 마지막으로 앞에서 실험한 최적 인자를 토대로 Delay Time과 PSR 적용 실험을 통해 재생 22hr(Heating 11hr, Cooling 11hr), 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 200~210℃, Delay Time 2hr(공급 24hr), purge 온도 heating 100℃, cooling 30℃를 Delay Time & PSR 적용 실험의 최적 운전 조건으로 설정하였다.

4. 결론

본 연구는 구미국가산업단지의 “A”사에서 설치, 운영되고 있는 고순도 압축공기 제조시스템을 운영함에 있어서 흡착식 Dryer의 에너지 사용량을 최대 절감할 수 있는 운전조건을 도출, 정립하기 위해 다양한 실험과 관찰을 진행하였다. 실험과 관찰은 고순도 압축공기 제조시스템 가동에 있어서 흡착식 Dryer의 주요 인자인 재생 시간, 재생 압력, heating 온도, 재생완료 후 교체시점까지의 Delay Time, 재생이 완료되었다고 판단하는 purge 온도를 가변시키면서 공급시간은 확대하고, 재생시간은 단축할 수 있는 운전조건을 탐색하였다.

또한 본 연구의 대상이 되었던 고순도 압축공기 제조시스템은 양산 중인 공정에 고순도 압축공기를 공급하는 것이었으므로 모든 인자를 동시에 가변시키는 복잡한 실험을 하는 것보다, 각 인자를 하나씩 가변시키면서 그 최적조건을 탐색하고, 다음 또 다른 인자에 대해서 최적조건을 탐색하는 순차 최적화 방식으로 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- (1) 재생 압력 실험에서는 2.5 bar, 2.7 bar, 3.0 bar, 3.3 bar의 네 가지 조건으로 실험을 실시해서 노점을 확인한 결과, 네 가지 조건 모두가 노점온도품질을 충족하였다. 그리고 그 중에서 재생 압력이 가장 낮은 2.5 bar에서 노점온도가 가장 좋았는데, 이는 재생 Tower 상부의 높은 온도의 영향을 받아서 공기 중의 수분이 잘 활성화 되었고, 낮은 압력으로 인해서 공기의 유속이 상대적으로 느려서 기공 속에 있는 수분도 잘 걷어가는 효과가 있어서 재생 압력이 낮은 2.5 bar에서 가장 좋았을 것으로 판단되며, 연간 재생 비용도 가장 낮은 것으로 확인되었다.
- (2) Heating 온도 실험에서는 200~210℃, 210~220℃, 220~230℃, 230~240℃의 네 가지 조건으로 실험을 실시한 결과, 가장 낮은 heating 온도인 200~210℃에서 노점이 가장 좋았으며, 또한 에너지 사용량 관점에서도 heating 온도 200~210℃일 때 연간 재생비용이 가장 낮은 것으로 확인되었다. 그 외의 tower 상부 온도, purge량, purge 온도 등은 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.
- (3) Time 운전 실험에서는 지금까지의 실험을 통해서 확인된 최적인자 조건인 재생 압력 2.5bar와 heating 온도 200~210℃의 조건에서 재생 12hr(Heating 6hr, Cooling 6hr), 14hr(Heating 7hr, Cooling 7hr), 16hr(Heating 8hr, Cooling 8hr)의 세 가지 조건으로 실험을 실시했다. 전체 에너지 사용량 관점에서는 크게 차이는 없지만, 재생 14hr(Heating 7hr, Cooling 7hr)일 때 연간 재생비용이 다소 낮은 것으로 확인 되었으며, 이를 Time 운전조건으로 선정하였다.
- (4) 노점 운전 실험에서는 tower 교체 조건을 노점온도 (-80℃)로 설정하여 설정된 노점온도가 될 때 까지 공급하는 방식인 노점 운전을 통해서 공급 가능시간 한계(24~26hr)에 대한 관찰의 의미가 있으며, 또한 급격한 변화를 보이는 양상과 그 시점을 확인함으로써 공급 공기의 품질을 보증하기 위한 기준시간을 설정할 수 있었다. 이에 따라 각각의 공급시간, 재생시간 및 공급 품질의 안정성을 고려해서 Delay Time은 8시간으로 실험하기로 하였다.
- (5) 노점 운전에서 Delay Time을 적용한 실험에서는 재생 14hr(Heating 7hr, Cooling 7hr), 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 200~210℃, Delay Time 8hr(공급 22hr)으로 실험을 실시한 결과, 공급시간 22hr 동안 흡수되는 수분을 재생 14hr 내에 모두 건조시키기에는 시간이 부족한 것으로 판단되며, 이런 운전을 지속할 경우 공급노점에 이상이 발생할 가능성이 있어 재생시간을 변화시키면서 해결방안을 찾기로 하였다.
- (6) 노점 운전 실험시 도출된 최대 공급 가능시간으로 Time 운전을 실시하여 설정된 purge 온도를 만족하는 재생 시간을 찾기 위한 PSR 조건 설정 실험을 실시한 결과, 공급시간을 24hr으로 설정해서 재생을 진행했을 때는 16.5hr 만에 재생이 완료되어 총 7.5hr 단축되었고, 재생시간을 28hr으로 설정해서 재생을 진행했을 때는 18.2hr 만에 재생이 완료되어 총 9.8hr 단축되었으나, 공급시간 27hr 만에 노점이 이탈되었다. 따라서 PSR 적용 실험시 공급시간은 24hr으로 설정해야 하며, 재생시간은 16.5hr 전후로 종료된다는 것을 확인할 수 있었다.
- (7) 실험에서 도출된 재생시간 조건에서 재생 압력과 heating 온도를 가변 하는 Delay Time 적용 실험을 실시해 보았다. 재생 16hr(Heating 10hr, Cooling 6hr), Delay Time 6hr(공급 22hr), purge 온도는 heating시 100℃, cooling시 40℃의 공통조건에 재생 압력과 heating 온도를 가변하는 두 가지 조건(재생 압력 3.3 bar에 heating 온도 200~210℃, 재생 압력 2.5 bar에 heating 온도 230~240℃)으로 Delay Time 적용 실험을 실시한 결과,

재생 압력 2.5 bar에 heating 온도 230~240℃일 때 연간 재생 비용이 낮은 것으로 확인 되었다.

- (8) 앞에서 실험한 최적 인자를 토대로 Delay Time과 PSR 적용 실험에서는 재생 22hr(Heating 11hr, Cooling 11hr), Delay Time 2hr(공급 24hr)으로 설정하고, 에너지 절감과 공급 품질 안정성 측면을 고려하여 purge 온도는 heating시 100℃, cooling시 30℃의 공통 조건에서 재생 압력과 heating 온도를 변화시키면서 세 가지 조건의 실험을 실시한 결과, 연간 에너지 사용량 관점에서 가장 우수한 재생 22hr(Heating 11hr, Cooling 11hr), 재생 압력 2.5 bar, heating 온도 200~210℃, Delay Time 2hr(공급 24hr), purge 온도 heating시 100℃, cooling시 30℃를 노점 운전에서 Delay Time & PSR 적용 실험의 운전조건으로 설정하였다.
- (9) 각 실험에서 선정된 운전조건에서 연간 에너지 사용량 관점에서 비교분석해 보면, 기존 운전방식인 Time 운전방식 대비 노점 운전에서 Delay Time과 PSR 적용 시 연간 18% 절감효과가 있는 것으로 나타났으며, 이를 흡착식 Dryer의 운전조건으로 설정하였다.

본 연구를 통해서 제품 제조상의 품질과 생산성에 지대한 영향을 미치는 고순도 압축공기 제조시스템의 흡착식 Dryer의 에너지를 절감할 수 있는 운전방법을 확보함과 동시에, 장기적인 운전의 측면에서 볼 때 재생 압력, 온도, 시간이라는 주요 인자에 대해서, 그 인자들이 다양하게 변화되었을 때 고순도 압축공기 제조시스템 작동상의 안정과 불안정한 양상을 파악했다. 또한 그에 따른 고순도 압축공기 제조시스템의 효율과 생산하는 공기의 품질 상태를 파악함으로써 최고의 효율과 성능을 발휘하도록 제어를 할 수 있는 기본 정보를 확보했다는 점에서도 큰 의의가 있다고 하겠다. 본 실험이 본격적으로 실시된 시기는 9~10월로써 계절적으로는 가을에 접어드는 시기라고 볼 수 있다. 고순도 압축공기 제조시스템은 외부로부터 흡입된 공기를 압축하여 생산현장으로 공급하는 장비로써 외부 공기의 온도 및 습도에 영향을 받으므로 특정한 시점의 운전조건을 모든 계절에 동일한 조건으로

운영하는 것은 타당하지 않다고 볼 수 있다. 따라서 전체적인 운전조건을 정립하기 위해서는 각 계절별로 대표적인 온도 및 습도 조건별로 운전조건을 탐색, 도출해서 사계절을 포함한 1년이라는 전체 주기의 운전조건을 정립해야 하는 것이 남은 과제라고 하겠다.

Acknowledgement

This study was supported by Kumoh National Institute of Technology Research Fund.

References

- [1] KATS, Energy Management System-KS A ISO 50001, 2011.
- [2] Lee, S.S., A study and Analysis on the Demands of Energy Conservation Technologies, *Journal of the Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2006, Vol. 29, No. 1, pp. 47-55.
- [3] Oh, S.J., Economic Analysis of Energy Savings for the Change of Heating Source of the Plating Solution-Focused on Plating Factories in Sihwa Industrial Complex, *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, 2015, Vol. 20, No. 1, pp. 31-38.
- [4] SPX Flow Technology Adsorption Air Dryer Available, <http://www.spflowkorea.com>.
- [5] Sung, G.D., Hydro-pneumatic General, Iljinsa, 1994.
- [6] Sungrim Sanupgaebal, Energy Diagnostic Report LG Electronics Gumi A3, 2012.

ORCID

- Seok-Wan Kang | <http://orcid.org/0000-0003-3524-1202>
 Sung-Ho Chang | <http://orcid.org/0000-0002-9758-2902>
 Hyeon-Joon Kim | <http://orcid.org/0000-0001-6869-7228>
 Sung-Soo Kim | <http://orcid.org/0000-0002-6613-8454>
 Yeong-Wook Lee | <http://orcid.org/0000-0003-0723-4822>