

해설논문

고분자 분리막을 이용한 공압시스템용 제습장치 개발동향 Analysis of research trend of dehumidification device with polymer membranes for pneumatic system



정은아
Eun-A Jeong
· 한국기계연구원 연구생
· jea6055@kimm.re.kr



윤소남
So-Nam Yun
· 한국기계연구원 책임연구원
· ysn688@kimm.re.kr

1. 서론

최근 다양한 공압시스템의 개발로 공압라인 내부의 수분제거에 관심이 집중되고 있다. 공압라인에서의 압축공기 수분은 공압설비에 매우 치명적인 해를 입힐 수 있다. 부식과 Scale을 일으켜 각종 기기의 공기 통로를 막을 수 있으며, 불순물 형성과 수분이 유분과 혼합되어 밸브의 고착을 발생시킬 수 있다. 또한 모터나 기구의 용량과 효율을 떨어뜨릴 수 있기 때문에 이러한 현상을 예방하기 위해 높은 효율성을 갖는 제습시스템 개발이 필요하다.

현재 제습공조 시스템은 국내외에서 활발히 연구 개발 되고 있으며, 제습시스템이 적용되는 곳은 박물관, 미술관, 문화재 보관설비, 창고, 지하건물, 제약공장 및 조선산업 등이 있다. 앞에서 기술한 것과 같이 다양한 곳에 적용될 수 있으며, 사용처에 따라 요구 특성과 용량에 차이가 있기 때문에 제습시스템의 종류에 따른 특성 파악이 정확히 이루어져야 한다. 제습시스템은 작동원리와 제습기능 소재에 따라 흡착식, 냉각식, 열전식, 고분자 분리막식 등으로 나눌 수

있다.¹⁾

본 원고에서는 제습시스템의 종류에 따른 특성과 이론, 국내외 연구동향 및 향후 개발 전망에 대하여 설명하고자 한다.

2. 제습시스템의 종류 및 특징

2.1 흡착식 제습시스템

흡착식 제습시스템은 수분과의 친화성 및 조해성을 갖고 있는 약품을 필터나 제습로터에 함침시켜서 제습기구로 사용하고 있으며, 이 기구에서 직접적인 수분의 흡탈착이 발생하여 건조한 공기를 생산하게 된다. Fig. 1은 액체 흡착제를 이용한 제습시스템의 작동원리를 나타내고 있다. 그림과 같은 액체 흡착식 제습시스템은 습공기로부터 수분을 제거하는 감습장치(Dehumidifier)와 수분을 흡수한 흡착제의 재사용을 위한 재생기(Regenerator), 가열장치와 냉각장치 등으로 구성되어 있다. Fig. 2는 고체식 제습제를 이용한 제습로터를 나타내고 있다. 로터 표면에 제습제가 함

침되어 있으며, 로터가 회전하면서 습윤한 공기의 수분을 제거하고, 건조공기를 배출하게 된다. 대표적인 두 가지 종류의 흡착식 제습시스템 효율에 영향을 미치는 요인으로는 유입되는 공기의 비열과 밀도, 제습 소재의 다공도, 유로의 형성과 수력직경, 유동방향 및 길이, 지름, 제습공기의 온습도 등이 있다.^{2~4)} 위와 같은 다양한 요소들 중에서 대표적으로 흡착제의 고유특성이 가장 큰 영향을 미치게 된다. 흡착제로는 고체식 흡착제와 액체식 흡착제가 있으며, 고체식 흡착제로는 대표적으로 실리카겔, 활성알루미나, 제올라이트 등이 있다. 액체식 흡착제로는 염화리튬 수용액, 트리에틸렌 글리콜 등이 있다.

흡착식 제습시스템은 주로 화학약품을 사용하는 제습방식으로 다른 방식에 비해 장점과 단점이 뚜렷하게 나타나는 시스템이다. 장점으로는 냉각식 제습 방식과는 달리 고온의 재생공기를 사용하기 때문에 미생물과 세균에 대한 살균 효과가 뛰어나서 유출공기의 오염도가 낮으며, 건조코일 방식을 적용하기 때문

에 불필요한 수분의 응축이 발생하지 않아 코일에 맺힌 응축수로 인한 효율저하가 일어나지 않는다. 또한 냉각식 제습시스템과 비교했을 때 상대적으로 운전비용을 절감할 수 있다. 그러나 치명적인 단점으로는 함침된 화학약품이 공기 중 수분과 화학반응하여 발생하는 부식성용매가 압축공기와 함께 외부로 누출되어 인체와 대기환경에 치명적인 해를 일으킬 수 있다는 것이다. 따라서 흡착식 제습시스템은 산업용 공조 과정에서 저노점이 필요할 때만 사용하게 되며, 대표적으로 대기에 영향을 미칠 수 있는 프레온 가스(Freon gas, CFCs)는 제외하고 사용한다. 최근에는 위와 같은 흡착제가 미치는 치명적인 단점을 보완하기 위하여 많은 연구기관에서 인체에 무해한 흡착소재를 개발하기 위한 노력을 하고 있다.

2.2 냉각식 제습시스템

냉각식 제습시스템은 냉각기 온도를 습공기 이슬점 이하로 낮추어 습공기에 포함되어 있는 수분을 응축시켜서 분리하고, 건조한 공기를 배출하는 원리로 작동된다. Fig. 3은 냉각식 제습시스템의 운전과정을 나타내고 있다. 에어드라이어에서 응축된 수분은 드레인 트랩에서 배출되게 되며, 입구로부터 유입된 공기는 일정량의 수분제거가 이루어진다. 마지막 단계의 출구공기는 소량의 수분을 포함하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 냉각식 제습시스템의 수분제거 특성으로 볼 때 냉각용량 및 재생용량의 증가 없이 온습도 조건을 만족시켜줄 수 있는 장점을 가질 수 있다. 하지만 총 냉방부하 중 잠열부하가 차지하는 비중이 클수록 증발기 또는 냉각 코일의 온도를 더욱

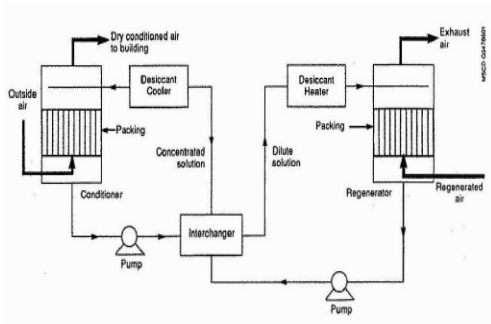


Fig. 1 Liquid desiccant dehumidification system

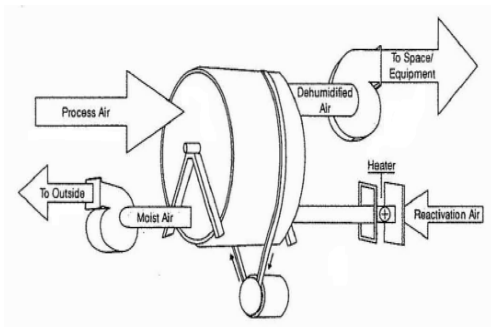


Fig. 2 Solid desiccant rotor dehumidifier (Munters Cargocaire)

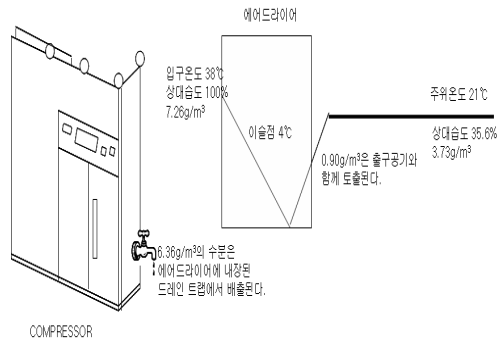


Fig. 3 Operating process of refrigerate dehumidification system

낮게 유지해야 하는 단점이 있으며, 공급공기의 온도가 필요이상으로 낮아지는 경우가 발생한다. 또한 냉동기 저온부 온도가 낮아짐에 따라 냉동 효율이 저하되며, 전체적인 에너지 효율이 감소하게 된다. 이러한 이유로 흡착식 제습시스템 보다 에너지 효율이 낮게 나타나며, 단점을 해결하기 위해 냉각기 흡착제 기능을 동시에 수행할 수 있는 하이브리드형의 제품 개발 연구가 활발히 이루어지고 있다.

2.3 열전 제습시스템

열전제습시스템은 열에너지와 전기에너지 사이의 변환으로 제습이 이루어진다. Fig. 4는 열전제습기의 구동 원리를 나타내고 있으며, 열전반도체 N형과 P형 반도체로 구성되어 있다. 열전제습기는 변환되는 반도체 소자 양단에서 흡열과 방열과정을 통한 온도차이가 발생하면서 소재 내부의 Carrier가 이동하게 되고, 기전력 발생과 동시에 온도차이로 인한 수분이 응축되게 된다. 열전제습시스템은 주로 Seebeck효과, Peltier효과, Tomson효과가 나타난다. 이러한 효과들을 이용하여 공기의 제습이외에도 가습기, CPU냉각, 김치냉장고 등에 적용되고 있다.

2.4 고분자 분리막 모듈 제습시스템

고분자 분리막을 이용한 제습시스템이란 판형, 중공사형 등과 같이 다양한 형태를 가지고 있고, 친수성 및 소수성 특성이 있는 고분자 분리막을 이용하여 습공기가 포함하고 있는 수분을 제거하고 건조한 공기를 만들어내는 것을 말한다. 고분자 분리막 소재를 이용하여 제조된 중공사막 모듈은 Fig. 5와 같이 제작할 수 있다. 다수의 고분자 분리막을 병렬형태로 엮어서 모듈을 제작할 수 있으며, 이러한 모듈은 기존의 제습공정보다 운전소음이 적으며, 유지보수 비용이 적은 장점이 있다. 또한 흡착제가 필요하지 않아 제습과정에서 발생하는 노후한 흡착물질로 인한 건조공기의 오염이 발생하지 않으며, 운전범위가 다양해서 여러 산업분야에도 적용이 가능하다. 고분자 분리막 제습시스템에서는 위에 나열된 모듈의 장점을 좀 더 향상시킬 수 있는 고분자 소재의 선택이 매우 중요하다. 고분자 분리막의 선택시 요구되는 사항은 주로 수분에 대한 선택성, 공기에 대한 투과성, 기계적 강도, 화학적 안정성, 내열성 등이 있다. 고분자 분리

막 소재로는 친수성 소재와 소수성 소재로 나눌 수 있으며, 현재 적용되고 있는 소재와 특성은 Table. 1에 각각 나타내었다. 대표적으로 가장 투과성이 좋은 소재로는 Ethyl Cellulose(EC)가 있으며, 선택된 고분자 분리막을 이용한 제습시험은 Fig. 6과 같이 장치를 구성하여 이루어지며, Purge gas로는 질소(N₂)가 사용된다. 습윤한 공기가 중공사막 모듈로 유입되게 되면 중공사막의 기공에 수분이 맺히게 되는데 이것은 중공사막의 기공이 투과되는 수증기 보다 사이즈가 크기 때문이다. 액체와 가스가 분리막 표면으로부터 유입되기 위해서는 투과 가능한 압력이 요구되며,^{5~7)} 기공에 맺힌 수분을 분리하기 위해서 진공펌프를 사용하여 응축수를 배출시키고, 건조공기를 만들어 낸다. 위와 같은 제습시험의 정확성을 높이기 위해서 유입되는 공기의 온도와 습도를 일정하게 조절할 수 있으며, 공급부와 잔류부에 각각 상대습도 및 절대습도를 측정하여 제습능력을 확인할 수 있다. 제습시험을 통해 얻어진 효율을 개선하기 위해서는 중공사막

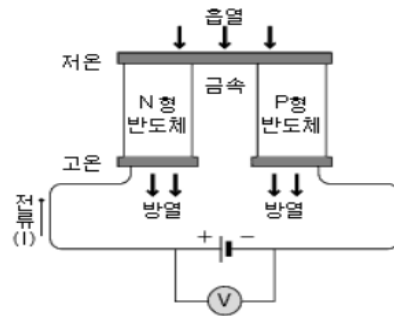


Fig. 4 Dehumidification system by thermoelectric module

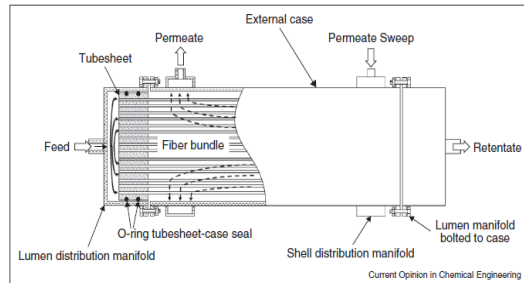


Fig. 5 Hollow fiber membrane module

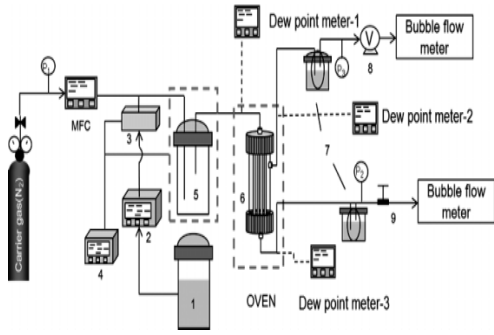


Fig. 6 Experimental equipment of hollow fiber membrane module

Table 1 Polymer membrane for dehumidification⁸⁾

Polymer membrane	Water Permeability (Barrer)
Polyethersulfone(PES)	2620
Polypropylene(PP)	68
Polyethylene(PE)	12
Polysulfone(PS)	2000
Polyimide(PI)	640
Polyvinyl Chloride(PVC)	275
Ethyl Cellulose(EC)	20000
Cellulose Acetate(CA)	6000
Polystyrene(PS)	970
Polyvinyl Alcohol(PVA)	19

의 투과성을 높여서 투과저항을 최소화하는데 노력을 기울여야 하며, 이중층의 유-무기 하이브리드 막의 제작을 통해 수분에 대한 선택성과 투과성능을 모두 개선해야 한다. 또한 고분자 분리막을 이용한 제습분야의 응용범위를 확장하기 위해 유기재료 이외에 다른 재질의 분리막 공정요구가 필요하다.

3. 제습시스템 이론

3.1 제습분리막 투과이론

습윤한 공기가 제습모듈내의 분리막을 통과할 때는 주로 압력과 온도, 분리막의 기공의 구조에 크게 영향을 받으며, 막을 통한 투과 기구로는 Kundsén 확산, 표면 확산, 기공내의 응축, Porseuille 흐름 등이 있다. 위와 같은 투과 특성을 통해 수분이 막에 응축되

게 되며, 막과의 분리를 통해 수분과 건조 공기는 외부로 배출되게 된다.

3.2 분리막 제습효율

분리막을 통한 압축공기내의 수분 투과와 제거에 관련된 기본적인 정의로는 상대습도, 포화수증기량, 이슬점 등이 있으며, Fig. 7에 압축공기와 대기압을 갖는 공기의 이슬점을 비교하였다. 상대습도란 동일한 체적 내에서 포화수증기량에 대한 임의의 수분 함유량을 나타낸 것이며, 포화수증기량은 상대습도와 마찬가지로 단위체적당 포함될 수 있는 최대의 수증기량을 말한다. 압력하 이슬점은 현재의 압력에서 온도를 낮추었을 때 수증기가 물로 변하는 시작온도를 말한다.

상대습도와 수증기 농도 및 제습효율은 식(1)~(3)을 통해서 구할 수 있다. 또한 제습과정에서 효율에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요소들을 평가하기 위해서는 물질흐름을 분석하여 수분과 공기의 혼합층이 각 부품을 통과하는 것을 평가해야 하며, 열분석을 통하여 잠열과 응축열의 확인이 필요하다.

$$RH(\%) = \frac{f}{F} \times 100 \quad (1)$$

상대습도는 식(1)로 계산할 수 있으며, f 는 대기중의 수증기압, F 는 대기온도에서의 포화수증기압, R 은 상대습도를 나타낸다. 공기 중에 포함된 수증기의 농도(C)는 식(2)로 계산할 수 있으며, R 은 기체상수,

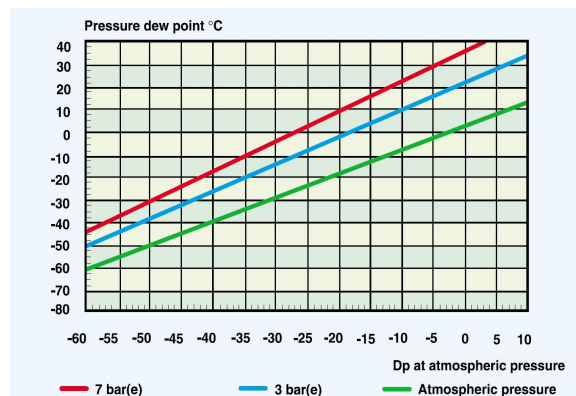


Fig. 7 Dew point in compressor air and atmospheric air

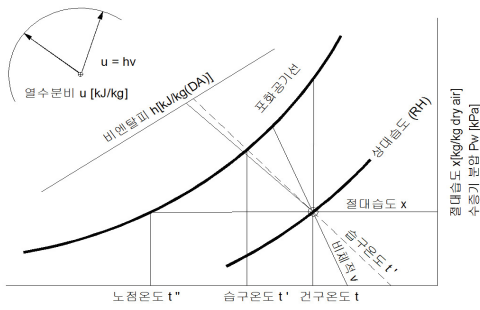


Fig. 8 Psychrometric chart(h-x)

P_s 는 포화수증기압을 나타낸다.

$$C = \frac{RH\% \cdot P_s(T)}{RH} \quad (2)$$

마지막으로 공기 제습막의 제습효율은 식(3)으로부터 계산할 수 있으며, W_F 는 Feed의 수증기량, W_R 는 Reject 수증기량을 나타낸다.

$$\frac{W_F - W_R}{W_F} \times 100 \quad (3)$$

Fig. 8은 습공기 선도를 나타내고 있다. 습공기 선도는 교차항목에 따라 세 가지 종류가 있고, 주로 절대습도(x)와 비엔탈피(h)를 사교좌표로 적용한 것을 사용하고 있다. 습공기 선도는 건공기와 수증기의 혼합물인 습공기의 여러 상태에서의 특성을 빠르게 비교할 수 있는 그래프이다. 이론적인 계산을 하는 경우에 정확하게 선도를 그릴 수 있는 장점을 가지고 있다. 건구온도 t, 습구온도 t*, 노점온도 t_d, 상대습도 ϕ, 비엔탈피 h, 절대습도 x, 비체적 v, 수증기 분압 p_s가 그래프에 표현되었으며, 이들 중 두 개의 값을 결정하면 공기 선도상의 상태점이 결정되며 나머지의 상태값을 모두 구할 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 운전압력과 온도 변화에 따른 수분과 질소 혼합기체의 투과도를 나타낸 것이다. PEBAX3533과 1657과 같은 코팅 소재에 따라서 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 압력이 증가함에 따라 고분자 매트릭스의 압축으로 인한 자유부피의 감소로 투과도가 감소된다. 마찬가지로 온도가 증

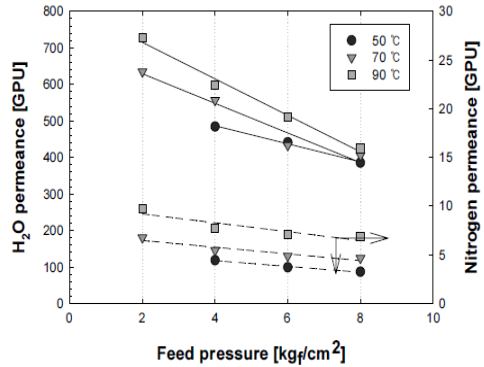


Fig. 9 H₂O and nitrogen permeance (PEBAX/PEI3533 at 50, 70 and 90°C)

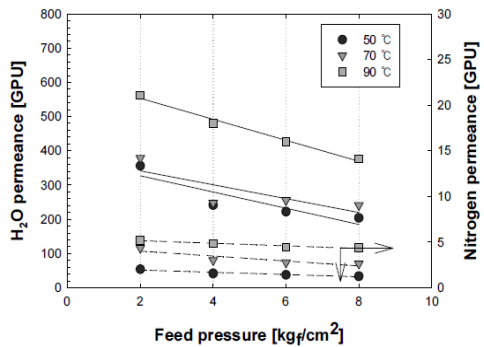


Fig. 10 H₂O and nitrogen permeance (PEBAX/PEI1657 at 50, 70 and 90°C)

가함에 따라서도 가스의 확산계수 증가로 인해 투과도가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 적절한 압력과 온도조건과 같은 운전환경에 따라 제습효율이 달라질 수 있기 때문에 용량에 맞는 운전환경 선정이 매우 중요하다.

4. 제습시스템의 국내외 기술개발 동향

4.1 국내 제습시스템 국내외 기술개발 동향

제습시스템 개발 초기에는 거의 전량 수입에 의존했지만 점차적으로 자체 개발이 이루어지면서, 최근에는 고분자를 이용한 제습모듈 뿐만 아니라 금속재료인 무기재료를 이용하여 막을 제조하고 제습효율을 평가하는 연구가 활발히 이루어지고 있다.



Fig. 11 Assembly of membrane module using hollow fiber for dehumidification (Airrane)



Fig. 12 Membrane air dryer using hollow fiber (Tonair korea)

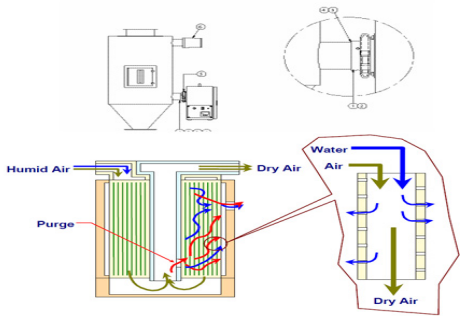


Fig. 13 Remote-mount membrane dryer airflow (AEC)

Fig. 11은 국내의 (주)에어레인에서 제작한 제습용 중공사막 모듈을 나타내는 그림이며, Fig. 12는 (주)한국토네어에서 중공사막을 이용한 멤브레인 에어드라이어를 제작한 것이다. 중공사막은 폴리스ulfone로 제작되었으며, 모듈 내에 수천개의 섬유가 들어있는 형

태를 이루고 있다.



Fig. 14 Compressed air micro dryer(Motan)

국내의 제습장치와 관련된 특허로는 국외에 비해 적은 편이며, 한국생산기술연구원에서 작성된 복합식의 제습냉방과 관련된 건이 있다. 그리고 호흡장치 라인에서의 수분을 제거와 관련된 특허들을 많이 찾아볼 수 있다.

4. 2 국외 제습시스템 기술개발 동향

분리막을 이용한 제습시스템은 국외에서도 많이 개발되고 있다. 대표적인 회사로는 Air Products, AEC Inc, Colortronic, Foremost Machine -Builders, Matsui America, Motan, Novatec, Sterling 등 있으며, 현재 다양한 형태의 제습시스템이 개발되고 있으며, 압축공기용 제습막 제품 또한 개발 및 판매하고 있다. Fig. 13과 Fig. 14는 AEC Inc와 Motan Inc의 시제품을 나타내었다. 두 제품 모두 중공사형 분리막을 적용하여 수분제거가 이루어지는 시스템이다.^{9~11)}

분리막을 이용한 제습시스템의 국외특허로는 미국, 일본, 호주 등의 국가에서 많이 보유하고 있으며, 제습장치 특허 분야로는 연료전지, 호흡장치, 제습과 냉각기능이 복합된 제습시스템, 분리막 모듈 설계 등이 있다. 또한 분리막과 흡착특성을 갖는 데시칸트형이 복합된 제습장치와 관련된 특허도 다수 확인할 수 있다.

5. 결 론

과거부터 현재까지 다양한 종류의 제습시스템이 개발되고 있으며, 많은 산업분야에서 필요성이 증가하고, 중요한 장치로 대두되고 있다. 대규모 플랜트 산업에서는 냉동형과 재생형이 복합된 제습시스템이

사용되고 있으나 냉동과정에서 에너지 소비가 높고, 효율이 좋지 못하여 이러한 단점을 보완할 수 있는 시스템이 개발되어야 한다. 제습시스템의 효율을 향상시킬 수 있는 방법은 여러 가지가 있으나 수분과의 직접적인 접촉이 있는 소재의 선택이 중요하다. 특히 고분자 분리막 소재는 표면적이 넓고, 친수성으로 제작이 가능하여 제습시스템의 효율을 높일 수 있다. 그리고 제조비용이 저렴하고, 대량 생산 및 공급이 가능한 장점을 가지고 있기 때문에 제습소재로의 고분자 분리막의 개발 및 적용이 필요하다. 또한 향후에는 고분자 소재를 응용한 제습시스템의 개발이 활발히 이루어질 것으로 생각되며, 고분자 소재의 표면 형태나 구조의 변화를 통해 수분과의 친화성을 높여서 제습효율을 높이고, 대량의 공기를 수용할 수 있는 시스템이나 극한환경과 같은 조건에서의 제습시스템의 응용범위를 확장할 수 있는 연구가 필요하다.

References

1. J. W. Rhim, H. Y. Hwang et al, 2004, "Application and Development of Dehumidification System-Focusing on Membrane Dryer", Membrane Journal, Vol. 14, No. 1, pp. 1-17.
2. D. S. Jeon, J. H. Mun et al, 2011, "Dehumidification Performance of a Plate Heat Exchanger Type Dehumidifier for a Liquid Desiccant system", pp. 177-180.
3. L. Z. Zhang, S. M. Huang et al, 2012, "Conjugate heat and mass transfer in a hollow fiber membrane module for liquid desiccant air dehumidification; A free surface model approach", International Journal of Heat and Mass Transfer, No. 55, pp. 3789-3799.
4. J. Y. Park, H. J. Cho et al, 2013, "Development of a Dehumidification Effectiveness Prediction Model for a Liquid Desiccant System with a Packed Tower", The Architectural Institute of Korea, Vol. 29, No. 10, pp. 259-266.
5. C. D. Park, C. H. Hyung et al, 2013, "Study on the Removal of Water Vapor Using PEI/PEBAX Composite Hollow fiber membrane", Membrane Journal, Vol. 23, No. 2, pp. 119-128.
6. S. Y. Jung, S. C. Lee et al, 2008, "A Study on the Characterizations of Silica-Ceramic Paper Dehumidifiers Impregnated with Zeolites", Clean Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 40-46.
7. N. C. Mat, Y. Lou et al, 2014, "Hollow fiber membrane modules", Current Opinion in Chemical Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 18-24.
8. H. C. Koh, C. S. Lee et al, 2011, "Developing Trend of Gas Separation Membrane for Dehumidification", KIC News, Vol. 14, No. 3, pp. 25-36.
9. EG-Tip, Energy GHG Technology Information Platform Service.
10. Tonair Korea Co. Membrane Air dryer manual.
11. P. Scovazzo, J. Burgos et al, 1998, "Developing Trend of Gas Separation Membrane for Dehumidification", Journal of Membrane Science, Vol. 149, pp. 69-81.