

공압시스템 제습용 중공사막 모듈의 하우징 형태에 따른 제습효율 특성 연구

A Study on Dehumidification Characteristics of Housing with Shape for Pneumatic System

정은아¹ · 이기윤² · 윤소남^{1*}

Eun-A Jeong, Kee-Yoon Lee, So-Nam Yun

Received: 02 Apr. 2019, Accepted: 21 May 2019

Key Words : Dehumidification(제습), Hollow Fiber Membrane Module(중공사막 모듈), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Pneumatic System(공압시스템)

Abstract: In this study, flow analysis and dehumidification experiments were performed on hollow fiber membrane module to confirm the dehumidification characteristics for its different configurations. The CFD for the three different models was conducted using 30°C temperature and 30%RH inlet humidity for quantitative analysis. Each model has different shape parameters i.e. the number of baffles. Comparison between flow analysis results and dehumidification experiment results revealed a percentage error of about 5%. The difference in relative humidity between the inlet and outlet for each model was calculated using flow analysis data. It was established that the difference in relative humidity of the inlet and outlet for the refined model with three baffles was highest among the three modeled modules of hollow fiber membrane module, i.e. around 9%.

1. 서 론

현재 중공사막 모듈에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 중공사막 모듈의 다양한 크기와 형태에 대해서도 많은 연구가 이루어지고 있다. 중공사막 모듈에는 주요 구성품으로는 고분자나 세라믹으로 이루어진 중공사막과 유체가 흐르는 내부에서 난류를 발생시켜 중공사막의 표면에 더 많은 접촉기회를 가질 수 있도록 제작된 하우징과 배플로 되어 있다. 중공사막 모듈은 다양한 시스템에 적용하기 전에 시뮬레이션을 이용하여 각 조건에 맞는 최적의 형태를 찾은 후 제작하는 것이 중요하다. 현재까지는

Chunyan Ma et al이 연구한 중공사막 모듈내부에서 중공사막의 위치와 크기가 정량적으로 변경됨에 따라 나타나는 특성들을 두 가지 종류로 비교하여 결과를 나타내었다.¹⁻³⁾ 하지만 중공사막 모듈에서의 형태적인 특성은 다양하게 변화할 수 있기 때문에 다양한 모델에 대한 분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 공압시스템 제습용으로 사용되는 중공사막 모듈의 주요 부품인 하우징의 배플이 제습효율에 미치는 영향을 분석하기 위해서 중공사막 모듈에 대한 제습실험을 수행하였다. 또한 제습 실험 결과를 바탕으로 동일한 조건으로 유동해석을 수행하여 결과에 대한 신뢰성을 확보한 후 다른 모델에 대한 모델링 후 유동해석을 수행하여 배플에 대한 제습특성에 미치는 영향을 정리하였다.

2. 이 론

본 논문에서 사용되는 중공사막에는 수많은 기공이 존재하며, 이러한 기공을 통해서 물질의 분리가 이루어진다. 중공사막과 같이 기공을 통해서 유동흐름과 저항이 발생하여 차압이 발생하는 것은 Darcy's

* Corresponding author: ysn688@kimm.re.kr

1 Energy System Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials, Deajeon 34103, Korea

2 Department of Organic Materials Engineering, Chung-Nam National University, Deajeon 34134, Korea

Copyright © 2019, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

law로 설명할 수 있다. 이 법칙은 식(1)과 같이 다공성 매질을 통과하는 유체의 단위 시간 당 유량과 유체의 점성으로 나타낼 수 있으며, 유체가 흐르는 거리와 그에 따른 압력 차이 사이의 비례관계를 의미한다.

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{k} \nu + c \frac{1}{2} \rho |V| \nu \right) \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 μ 는 유체의 점성계수 [$kg/(m \cdot sec)$]를 나타내며, ν 는 유속벡터 [m/s]를 나타낸다. 또한 k 는 투수계수, ρ 은 밀도 [kg/m^3]를 나타낸다. 이 식은 점성에 대한 손실항과 관성에 대한 손실항으로 구성되어 있으며, 압력강하는 점성손실에 의해서만 발생하고, 다공성 매질에서는 유체의 속도에 비례하여 압력강하를 일으킨다.

다공성 매질에서 발생하는 유체의 저항에 대해 구체적으로 설명하면 Forchhemier 법칙을 적용할 수 있으며, 방향에 따라 서로 다른 손실계수를 부과하는 방향성 손실 모델(Directional loss model)을 나타낸다. 이 모델은 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla P = - \frac{\mu}{k_{perm}} V - k_{loss} \frac{\rho}{2} |V| \nu \quad (2)$$

여기서, P와 V는 각각 유동의 압력과 속도로 나타내며, μ 와 ρ 는 작동유체의 점성계수(Dynamic viscosity)와 밀도(Density)를 나타낸다. 그리고 k_{perm} 와 k_{loss} 는 각각 다공성 매질의 투과율(Permeability)과 손실계수(Loss Coefficient)를 가리킨다.

식 (2)에서 전자는 점성에 의한 압력강하로서 Darcy 법칙(Darcy's Law)이라 불리며, 후자는 관성(Inertial)에 의한 압력강하로서 Forchheimer 법칙(Forchheimer Law)이라 불린다.

Darcy 법칙은 매우 느린유동(Slow or Creeping Flows)에서만 타당하다고 알려져 있으며, 유동속도가 증가하면 관성효과가 커지게 되어 Forchheimer 법칙보다 타당해진다. 만약 입구 유동속도가 매우 빠르게 되면 점성효과를 무시하고 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 종방향과 횡방향에 대해 아래와 같이 식 (4)와 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\nabla P = - k_{loss} \frac{\rho}{2} |v| v \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = - k_{loss} \cdot n \frac{\rho}{2} |v| v_n \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = - (\alpha k_{loss} \cdot n) \frac{\rho}{2} |v| v_t \quad (5)$$

위와 같은 식을 이용하여 본 연구에 적용된 중공사막 모듈의 주요 구성품인 중공사막에서 발생하는 유체의 특성을 확인할 수 있다.⁴⁾

3. 중공사막 모듈을 이용한 제습특성 실험

중공사막 모듈의 제습특성을 확인하기 위해서 실험 장비를 구축하였다. 실험 장비는 Fig. 1의 회로도 와 동일하게 구축하였으며, 실제 실험장비는 Fig. 3에 나타내었다. 중공사막 모듈로는 MICRODYN-NADIR사의 모델 FB02-FC-FUS0353를 구입하여 사용하였다. 계측장비로는 온도-습도 센서(NHT-150)와 압력센서 (PCH-1MPa), 유량계(F-112AC-M20-ABD-55-V)가 각각 중공사막의 입·출구에 사용되었다. 센서를 설치하기 위해서 지그를 제작하여 사용하였으며, 각 센서의 측정부를 내부에 넣고 고정할 수 있도록 하여 유체가 센서를 통과한 후, 중공사막 모듈의 입구로 바로 유입될 수 있도록 하였다. 또한, 계측된 데이터를 저장하기 위해 DAQ 장비인 데베트론(Dewetron)을 사용하였다. 제습특성 실험에서 관심대상은 중공사막 모듈 입구와 출구의 온도 및 습도이며, 이들 변수 변화에

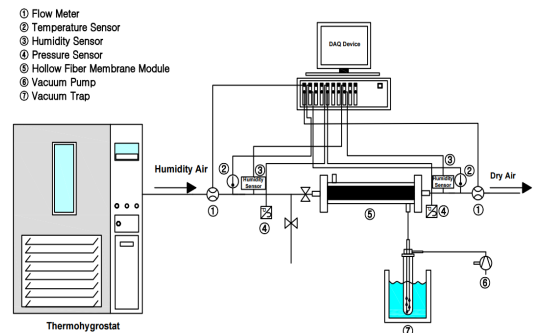


Fig. 1 Schematic diagram of the test rig

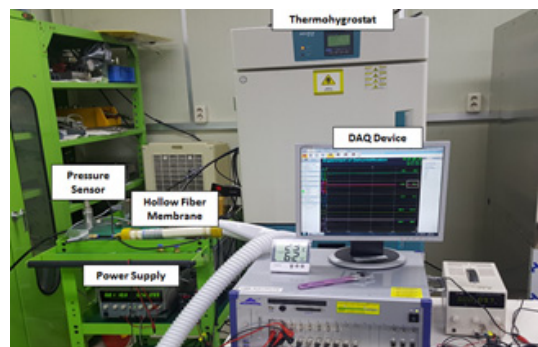


Fig. 2 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Temperature[°C]	20, 30, 40
Relative humidity[%]	30, 40, 50, 60, 70
Inlet pressure[bar]	0.53
Inlet flow[lpm]	24
Environment	25°C

따른 제습특성을 확인할 목적으로 Table 1과 같은 조건으로 실험을 수행하였으며, 본 논문에서는 대표적으로 온도 30°C 습도 30%RH의 조건일 때의 결과만을 유동해석 결과와 비교하기 위해 제시하였다.⁵⁻¹³⁾

4. 중공사막 모듈에 대한 유동해석

본 연구에서는 중공사막 모듈의 배플 형태에 따른 제습특성을 분석하고자 중공사막 모듈에 대한 유동해석을 수행하였다. 유동해석 결과는 중공사막 모듈에 대한 실험을 통하여 일부 증명된 결과를 바탕으로 하여 다양한 중공사막 모듈에 하우징에 포함되어 있는 배플의 개수에 따른 제습특성을 확인하기 위하여 앞 절의 실험조건과 동일한 조건으로 설정하여 유동해석이 수행되었다. 중공사막 모듈의 하우징에 포함된 배플의 수는 Fig. 3과 같이 1개, 2개, 3개로 모델링 되었다. 또한 모델링된 중공사막 모듈은 Fig. 4와 같이 습한 공기가 유입되는 입구와 건조한 공기가 유출되는 출구 1과 출구 2를 각각 지정하여 사용하였다.

중공사막 모듈에 대한 수분제거율과 각 중공사막의 기공을 통과하는 습공기의 조성을 확인하기 위해서 유동해석을 수행하였다. 유동해석을 수행하기 위해 사용한 소프트웨어는 상용 ANSYS FLUNET 14.5이며, 유동해석 과정에서 적용된 해석모델은 중공사막 모듈 입구로부터 습공기가 중공사막을 통과하여 출구로 배출될 때의 습도를 파악하기 위해 상대습도(Relative Humidity)를 확인할 수 있는 Species모델을 설정하였다. 또한 각 중공사막에서 시간에 따라 변화하는 습공기 조성을 확인하기 위해 각각의 중공사막에 대하여 Fluent의 모니터링을 기능을 설정하여 데이터를 확보하도록 하였다. 유동해석은 실험조건과 동일한 입구압력 0.53bar의 조건으로 수행되었다. 유동해석에 대한 자세한 경계조건은 Table 2에 나타나 있다. 유동해석을 수행하여 30°C의 온도와 30%RH 습도 조건에서 기본 모델(Model no.1)의 실험 결과값과 해석결과인 상대습도 계산값을 비교하였다. 또한

다양한 모델에 대한 수분제거 특성을 분석하기 위해 위와 동일한 조건으로 나머지 3개의 모델에 대한 유동해석을 수행하였다.

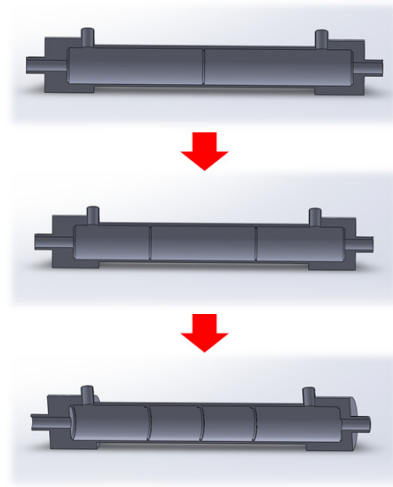


Fig. 3 Modeling of housing

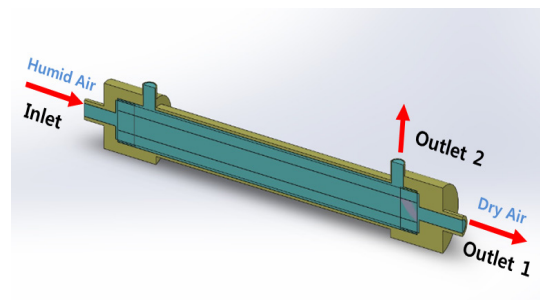


Fig. 4 Approximation model of hollow fiber membrane module

Table 2 CFD parameters for characteristic of dehumidification

CFD Settings	
Software	ANSYS FLUENT 14.5
Model	Species Transport: Mixture-Template: Air/Water Vapor(Species: 2)
Inlet	Pressure Inlet Pressure[bar]: 0.53 Species Mass Fraction: 0.5
Outlet	Pressure Outlet: 0[bar]
Temperature	Inlet: 303[K] Wall: 298[K]
Porosity	0.5

5. 결 과

실험결과와 유동해석 결과를 비교하기 입구에서 유입되는 습공기의 온도는 30℃, 습도가 30%RH의 조건일 때 실험결과와 유동해석 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5는 실험결과를 나타낸 것이며, 중공사막을 통하여 제습되는 상태를 측정하는 것으로, 중공사막 전후에 설치되어 있는 습도센서를 이용하여 중공사막의 성능을 예측하고자 하였다. 습도를 측정할 시간인 0에서 200초까지는 입구와 출구에서 상대습도가 급격히 증가하다가 200초 이후에는 서서히 일정한 상대습도 차이를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 0에서 200초에서는 입·출구의 차이가 전 구간 중에 가장 크게 나타나는 구간으로 출구부에서도 상대습도가 증가함과 동시에 약 50초 동안 유지하는 것으로 보아 중공사막의 기공에 일부 수분이 흡착되는 구간으로 볼 수 있다.

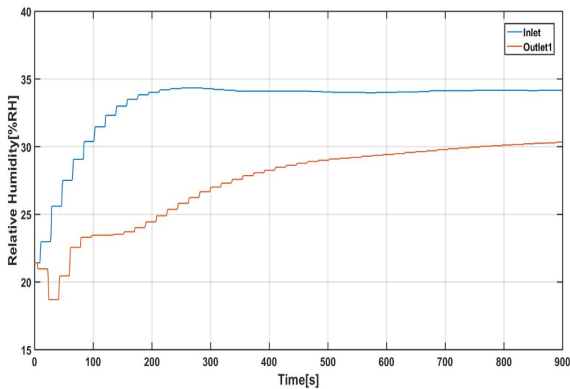


Fig. 5 Experimental results of dehumidification characteristics between inlet and outlet1 port of hollow fiber membrane module using vacuum pressure at outlet2(30℃, 30%RH)

유동해석 결과는 제습실험결과와 동일하게 온도 30℃와 습도 30%RH의 조건에서 시간에 따른 입구와 출구의 상대습도를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5의 실험결과에서는 실험장치의 관로 영향으로 인하여 입구에서 약 35%의 상대습도가 나타났으나 해석에서는 30%의 상대습도를 고정으로 하여 해석이 수행되었다. 실험과 해석의 오차는 약 5%를 보이는데, 해석에 사용된 중공사막은 실제모델에 비해 적은 수를 사용했기 때문이다. 실제 구입한 모델에 대한 실험결과와 유동해석의 오차가 발생하는 이유는 중공사막의 부피에 해당되는 충진률은 유사하게 모델링되었

으나 마이크로 단위의 수백개의 중공사막을 각각 모델링하여 사용하지 않았기 때문에 5%의 오차가 발생하는 것으로 알 수 있다.

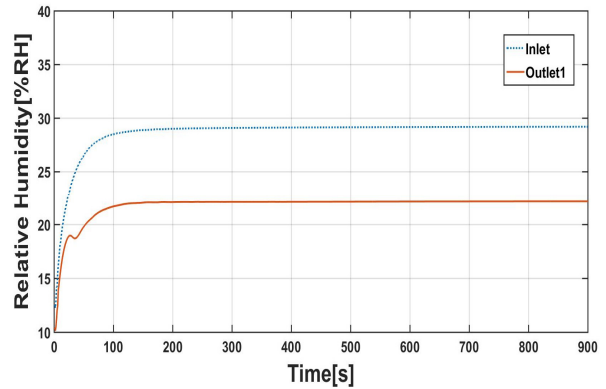
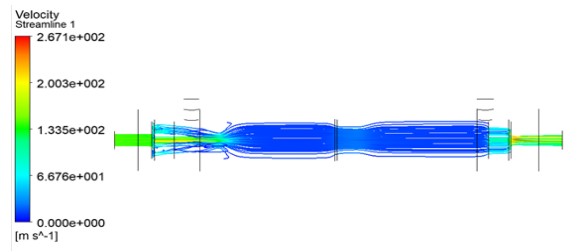
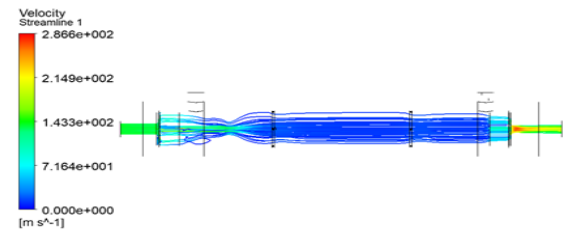


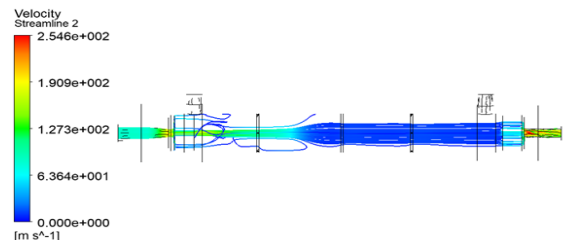
Fig. 6 Flow analysis results of dehumidification characteristics between inlet and outlet1 port of hollow fiber membrane module using vacuum pressure at outlet2(30℃, 30%RH)



a) Baffle 1



b) Baffle 2



c) Baffle 3

Fig. 7 Flow analysis results of velocity streamline of hollow fiber membrane module(30℃, 30%RH)

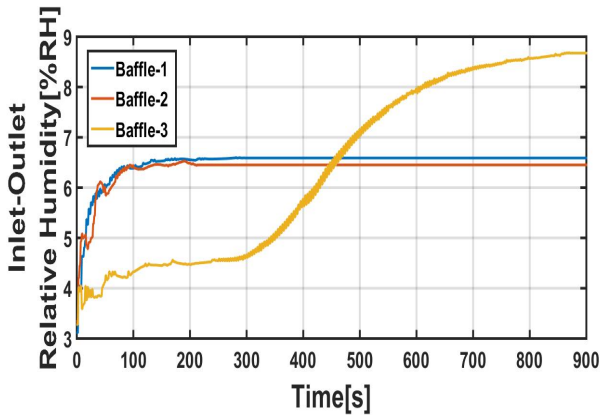


Fig. 8 Flow analysis results of velocity streamline of hollow fiber membrane module(30°C, 30%RH)

Fig. 7의 결과는 중공사막 모듈의 배플수에 따라 나타나는 속도와 압력분포 및 속도 스트림라인을 나타내었다. 중공사막 모듈에서의 배플수에 따라 제습 특성이 변화하게 된다. 배플의 수가 많아짐에 따라 중앙부에 충전되어 있는 중공사막으로 유입되는 유체의 분포가 늘어나기 때문에 제습효율에 영향을 미칠 수 있으며, Fig. 7의 결과를 토대로 Fig.8에 중공사막 모듈에서의 배플의 수에 따른 입구와 출구의 상대습도 차이를 나타낸 그래프를 제시하였다. Fig. 8에 제시한 그래프에서는 배플의 수가 1개와 2개 일 때는 입구와 출구의 상대습도의 6.5%로 낮으나 배플이 3개 일 때는 입구와 출구의 상대습도 차이가 약 9%까지 증가하는 것을 확인할 수 있다. 입구에 유입되는 상대습도가 일정함에 따라 출구와의 차이가 늘어나는 것은 중공사막이 더 많은 수증기를 흡착하고 있다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 공압시스템용으로 사용되는 중공사막 모듈의 하우징에 포함되어 있는 주요 부품인 배플 수에 따른 제습특성을 유동해석을 통해서 분석하였다. 실험과 동일한 조건으로 유동해석을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 중공사막 모듈에 대한 유동해석 결과는 실험결과와 비교하여 약 5%의 오차율을 보이는 것을 확인하였으며, 신뢰성을 확보한 후 하우징 크기가 동일한 다른 모듈에 대하여 유동해석을 수행하였다.

2. 중공사막 모듈의 주요 구성품인 배플의 수가 증가함에 따라 습공기에서 많은 수분의 양을 분리해내

는 것을 알 수 있으며, 배플이 1개에서 2개 일 때는 거의 유사한 결과를 보인다.

3. 본 연구에서와 같이 주요 구성품의 수에도 수분의 분리효율이 크게 달라질 수 있기 때문에 향후에는 다양한 설계변수를 이용하여 다양한 모델에 대한 분석이 필요하다.

References

- 1) A. Gurubalan, M. P. Maiya and S. Tiwari, "Performance characterization of membrane dehumidifier with desiccants in flat-plate arrangement", *Energy and Buildings*, Vol.156, pp.151-162, 2017.
- 2) K. J. Chua, S. K. Chou and M. R. Islam, "Integrating Composite Desiccant and Membrane Dehumidifier to Enhance Building Energy Efficiency", *Energy Procedia*, Vol.143 pp.186-191, 2017.
- 3) C. Z. Liang and T. S. Chung, "Robust thin film composite PDMS/PAN hollow fiber membranes for water vapor removal from humid air and gases", *Separation and Purification Technology*, Vol.202, pp.345-356, 2018.
- 4) M. H. Song and K. Y. Kim, "Numerical Study on Flow Distribution in PEMFC with Metal Foam Bipolar Plate", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol.27, No.1, pp.29-35, 2016.
- 5) S. Saneinejad et al., "Coupled CFD, radiation and porous media transport model for evaluating evaporative cooling in an urban environment", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.104-106, pp.455-463, 2012.
- 6) E. A. Jeong et al., "Numerical analysis and validation of a multiphase in hollow fiber membrane module for compressed air", *Proceedings of 2016 Spring Conference on Drive Control*, pp.53-54, 2016.
- 7) I. Julián, J. Herguido and M. Menéndez, "Gas permeation effect on the Two-Section Two-Zone Fluidized Bed Membrane Reactor(TS-TZFBMR) fluid dynamics: A CFD simulation study", *Chemical Engineering Journal*, Vol.305, pp.201-211, 2016.
- 8) G. Zhang et al., "Review of experimentation and

- modeling of heat and mass transfer performance of fin-and-tube heat exchangers with dehumidification," *Applied Thermal Engineering*, Vol.146, pp.701-717, 2019.
- 9) X. Han et al., "A novel system of the isothermal dehumidification in a room air-conditioner," *Energy and Buildings*, Vol.57, pp.14-19, 2013.
- 10) E. A. Jeong et al., "Numerical analysis and validation of a multiphase in hollow fiber membrane module for compressed air", *Proceedings of 2016 Spring Conference on Drive Control*, pp.53-54, 2016.
- 11) Solidworks 2015, Dassault Systèmes.
- 12) ANSYS FLUENT v14.5, ANSYS Korea.
- 13) DEWETRON(DEWE-800), DEWETRON Korea.