



# 공압시스템 제습용 중공사막 모듈의 성능검증을 위한 유동해석 연구

## A Study on Flow Analysis of Hollow Fiber Membrane Module for Pneumatic System Dehumidification

정은아\* · 이기윤\*\* · 윤소남\*†

Eun-A Jeong\*, Kee-Yoon Lee\*\* and So-Nam Yun\*†

(Received 28 January 2019, Revision received 22 April 2019, Accepted 22 April 2019)

**Abstract:** Dehumidification in the pneumatic system is an important factor for preventing efficiency decrease and malfunction due to humid air. Various dehumidifiers have been developed until now and especially dehumidifiers using polymer membrane have been studied for low cost and easy manufacture. In this study, experiments and flow analysis of hollow fiber membrane module were performed for confirming the efficiency of dehumidification which is also related to the pneumatic system performance improvement. Water removal ability and adsorption performance of hollow fiber membrane module were confirmed by results of flow analysis and experiments, and the reliability of the flow analysis could be obtained through the comparison with experiment results. From this study, dehumidification phenomena in the hollow fiber membrane module were found out, and the basic design concept for the next generation dehumidification system was also discussed.

**Key Words :** Dehumidification, Hollow Fiber Membrane Module, Computational Fluid Dynamics, Pneumatic

### 1. 서 론

공압용 제습장치는 공압 장비들의 오작동과 부식을 예방할 수 있으며, 습공기의 유입으로 인한 장비의 효율저하를 막을 수 있기 때문에 현재 산업용 공압장치의 성능 향상 차원에서 많은 제습장치들이 연구되고 있다.

제습장치의 종류는 제습방식에 따라서 물리적 제습장치와 화학적 제습장치로 나누어진다. 물리적 제습장치에는 냉각식과 압축식이 있으며, 화학적 제습장치에는 공기 중의 수분을 끌어당겨 액체화되는 특성을 가진 화학약품을 이용한 흡수식과 실리카겔과 같은 기공에 수분을 채우는 흡착식으로 나눌 수 있다.<sup>1)</sup> 물리적 제습장치는 주로

\*† 윤소남(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-8405-8135>) : 책임연구원, 한국기계연구원 열시스템연구실  
 E-mail : ysn688@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7155  
 \*정은아(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5324-4768>) : 위촉연구원, 한국기계연구원 열시스템연구실  
 \*\*이기윤(ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-4920-5931>) : 교수, 충남대학교 고분자공학과

\*† So-Nam Yun(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-8405-8135>) : Senior researcher, Department of Thermal Systems, Korea Institute of Machinery & Materials.  
 E-mail : ysn688@kimm.re.kr, Tel : 042-868-7155  
 \*Eun-A Jeong(ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-5324-4768>) : Research student, Department of Thermal Systems, Korea Institute of Machinery & Materials.  
 \*\*Kee-Yoon Lee(ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-4920-5931>) : Professor, Department of Organic Materials Engineering, Chung-Nam National University.

냉각 배관 같은 부품의 온도를 일정하게 유지할 필요가 있으며, 이로 인하여 에너지 소비가 증가하는 단점을 가지고 있으며, 화학적 제습장치는 화학약품의 비산이나 유출로 인하여 인체에 영향을 미치는 단점이 있다. 이러한 단점들을 상호보완하기 위하여 고분자 분리막을 제습장치에 적용하는 연구가 오래전부터 수행되어 왔으며, 현재에는 분리막의 형태를 개선하여 다수의 중공사막을 패키징하여 표면적을 넓혀 효율을 증대시킨 장치들이 개발되고 있다. 위와 같이 개발된 중공사막 모듈에 대한 성능을 확인하기 위해 제습실험들이 수행되고 있으며, S. M. Huang에 의해 연구된 중공사막 제습실험과 같이 기체에 포함된 수분의 분리효율을 높이기 위해 중공사막에 흡착제를 침투시킨 모듈에 대한 연구에서부터 다양한 형태의 실제모델에 대해서까지 실험을 통하여 분석이 이루어지고 있으나 실험데이터를 이용하여 모델을 개선하기에는 다양한 변수들을 고려하기 매우 어렵다.<sup>2)</sup> 따라서 다양한 변수들을 고려하여 모듈의 효율향상과 소형화시키기 위한 수치적 연구는 필요하다. C. Ma에 의해 중공사막 모듈내에서의 중공사막 각 위치에 대한 영향력이 연구되었다.<sup>3)</sup> 또한 유사한 연구로 J. Wang에 의해 연구된 중공사막 모듈에 대한 수치적 해석 연구에서는 중공사막 가닥의 위치에 따른 외부로 흐르는 유체의 특성에 대해서는 연구되어 있지만 주요한 부품인 중공사막 자체의 다공성을 고려한 수분의 침투량과 분포에 대해서는 연구되어 있지 않다.<sup>4)</sup> 중공사막을 이용한 물질 분리 효율 향상을 위해서는 압력, 유량, 온도 등과 같은 다양한 변수에 따른 중공사막 내부의 유체 흐름에 대한 특성을 확인할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 중공사막 모듈에 사용된 친수성 분리막의 특성에 따라 습공기에서의 수분 분리특성을 분석하기 위하여 실험을 수행하였으며, 향후의 모듈 내부 형상변화에 따른 특성을 분석하기 위한 기본 연구로 근사모델에 대한 유동해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 제습실험을 통하여 도출된 결과를 이용하여 해석결과에 대한 신뢰성 및 타당성을 확보하였으며, 또한 근

사모델에 대한 중공사막의 다공성 변수에 따른 특성을 확인하였다.

## 2. 중공사막 모듈의 제습특성 실험

본 논문에서 제습실험의 목적은 중공사막 모듈에 습공기가 통과할 때의 입구와 출구의 공기 수분조성 특성과 중공사막 내부 기공의 실험 종료 지점에서 나타나는 수분 잔류 특성을 확인하는 것이다.

중공사막 모듈의 제습특성을 확인하기 위해서 실험 장비를 구축하였다. 실험 장비는 Fig. 1의 회로도와 동일하게 구축하였으며, 실제 실험장비는 Fig. 2에 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 사용되었으며, 센서별 측정 및 제어범위와 오차범위는 Table 1에 나타내었다. 각각의 센서를 설치하기 위해서 지그를 제작하여 사용하였다. 지그는 직육면체 형태를 갖고 있으며, 각 센서의 측정부를 내부에 넣고 고정할 수 있도록 하여 유체가 채워짐과 동시에 중공사막 모듈의 입구로 유입될 수 있도록 하였다. 또한 데이터를 저장하기 위해 DAQ 장비인 데벤투론(Dewetron)을 사용하였다. 제습특성 실험에서 관심대상은 중공사막 모듈 입구의 온도 및 습도이며, 이들 변수 변화에 따른 제습특성을 확인할 목적으로 Table 2와 같은 조건으로 실험을 수행하였다.

실험을 수행하기 전 중공사막 모듈의 내부에 포함하고 있는 수분을 제거하기 위해 건조한 공기를 흘려주고, 동시에 진공펌프를 사용하여 습공기를 배출하였다. 배출이 끝난 후 각 실험조건에 맞는 습공기를 15분 동안 유입하였으며, 입구와 출구에서 각각 데이터를 저장하였다. 또한 모든 실험을 수행하기 전 중공사막 모듈의 내부에 포함하고 있는 수분을 제거하기 위해 건조한 공기를 흘려주고, 동시에 진공펌프를 사용하여 습공기를 배출하였다. 배출이 끝난 후 각 실험조건에

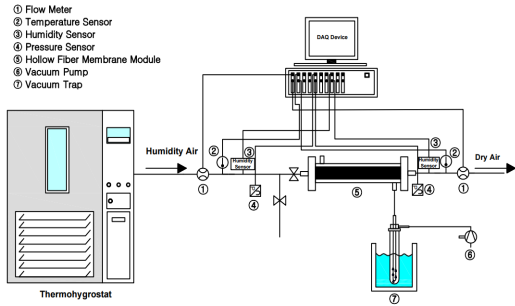


Fig. 1 Schematic diagram of the test rig

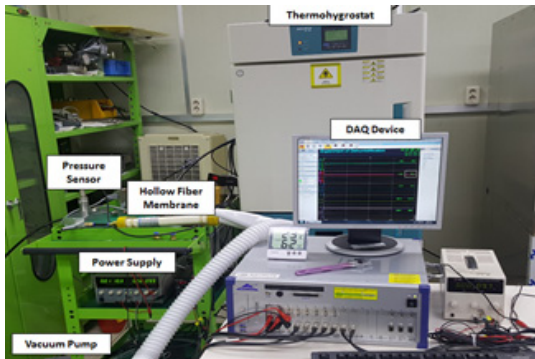


Fig. 2 Experimental setup

Table 1 Device of measurement range

Device	Specifications	Variation
Thermo hygrostat	25~100°C 30~90%RH	±0.3°C ±3.0%RH
Temperature sensor	-20.0~60°C	±0.5~ 1.0°C
Humidity sensor	0.0~99.99%RH	±3.0~ 6.0%RH
Flow meter	0~10 lpm 0~200 lpm	±0.5%
Pressure sensor	0~10 bar	0.3%

맞는 습공기를 15분 동안 유입하였으며, 입구와 출구에서 각각 데이터를 저장하였다. 또한 모든 실험과정에서 중공사막 모듈에 남아있는 수분의 잔류량을 측정하기 위해 실험 직전과 직후에 무게를 측정하여 기록하였다.<sup>5)</sup>

Table 2 Experimental conditions

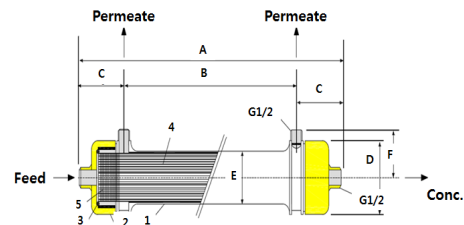
Temperature[°C]	20, 30, 40
Relative humidity[%]	30, 40, 50, 60, 70
Inlet pressure[bar]	0.53
Inlet flow[lpm]	24
Environment	25°C

### 3. 중공사막 모듈의 유동해석

#### 3.1 중공사막 모듈 모델링 및 격자생성

본 연구에서 사용된 중공사막 모듈에 대한 자세한 사양은 Fig. 3에 나타내었다. 중공사막 모듈에는 총 4개의 유체 출입구가 있으며, 수분에 대한 친수성을 갖는 폴리에서설펜(Polyethersulfone) 고분자가 사용되었다. 공사막 모듈에 대하여 근사 모델을 Fig. 4와 같이 모델링하였다. 본 논문에서는 Fig. 4에 나타난 중공사막 모듈의 입구와 출구로 Inlet과 Outlet 1을 사용하였으며, Outlet 2는 건조과정에서 진공펌프를 연결하기 위한 연결부로 사용되었다. 모델링은 상용 소프트웨어인 Solidworks 2015를 사용하였다.

유동해석과정에서 경계조건을 설정하기 전에 중공사막 모듈에 대하여 격자를 형성하였으며, 다



Dimension [mm]	Module						Accessories	
	A	B	C	D	E	F	Article	Name
	356	250	53	Φ60	Φ45	42	1	Case
							2	Cap
							3	O-Ring type AS568-239
							4	Hollow fiber
							5	Potting resin
							FPS: Fluoro rubber	42

Fig. 3 Schematic of hollow fiber membrane module

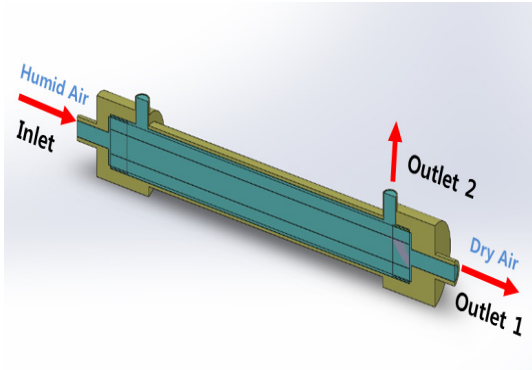


Fig. 4 Approximation model of hollow fiber membrane module

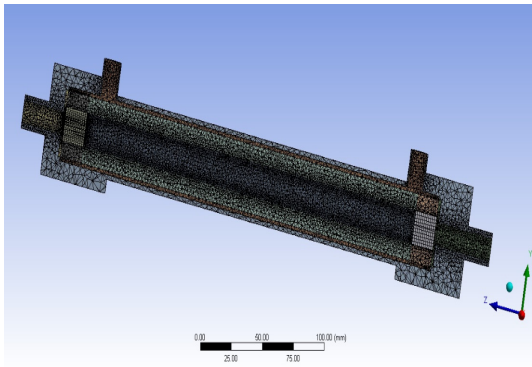


Fig. 5 Mesh of hollow fiber membrane module

Table 3 Mesh generation of hollow fiber membrane module

Contents	Value
Nodes	109162
Elements	562243

공성 처리를 위해 Smoothing 조건을 적용하였다. 격자 형성에 대한 그림은 Fig. 5에 나타내었으며, 적용된 격자수는 Table 3에 나타내었다. 중공사막 모듈의 주요부품의 형상이 다양하기 때문에 다양한 격자 형태를 사용하여 격자를 생성하였다.

### 3.2 경계조건

중공사막 모듈에 대한 유동해석을 수행하기 위하여 상용 소프트웨어인 ANSYS Fluent를 사용하

Table 4 CFD parameters for dehumidification characteristics

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: 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7
Outlet	Pressure Outlet[bar]: 0
Temperature	Inlet: 20°C, 30°C, 40°C Wall: 25°C
Porosity	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9

였으며, 해석에 사용된 정보는 Table 4와 같다. 앞의 3.1절에서 모델링 된 중공사막 모듈의 근사모델에 대한 유동해석이 이루어졌다. 중공사막 모듈에 두 가지 유체인 공기와 수증기가 통과할 때의 상대습도와 중공사막 모듈의 주요 부품인 중공사막에서의 수증기의 조성을 확인하기 위하여 Species 모델을 선택하여 사용하였다. 또한 실험과 동일한 조건으로 유동해석을 수행하였으며, 근사모델의 다공성도(0.1~0.9)를 다양하게 조절하여 유동특성 확인하고자 하였다.<sup>6-7)</sup>

## 4. 실험 및 해석결과

### 4.1 제습실험 결과

중공사막 모듈에 대한 제습실험결과는 4.2절의 유동해석 결과와 비교하기 위하여 30°C에서 30%의 상대습도를 갖는 초기조건을 동일하게 적용하였으며, 실험결과는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 중공사막을 통하여 제습되는 상태를 측정하는 것으로, 중공사막 전후에 설치되어 있는 습도센서를 이용하여 중공사막의 성능을 예측하고자 하였다. Fig. 6에서 0~200 s까지는 입구와 출구에서 상대습도가 급격히 증가하다가 200 s 이후에는 서서히

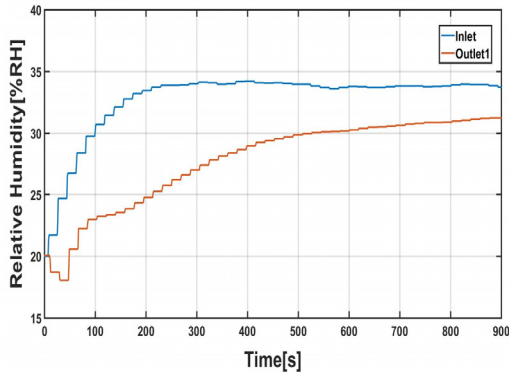
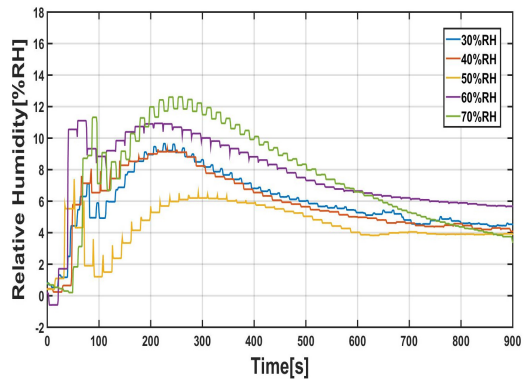


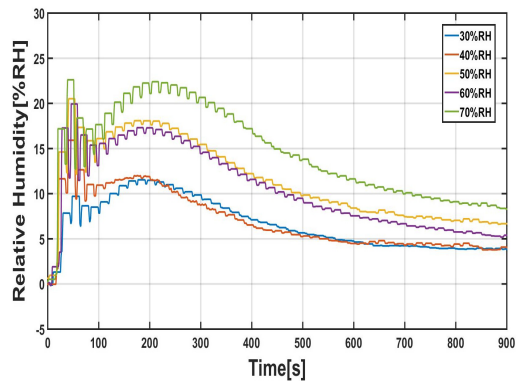
Fig. 6 Experimental results of dehumidification characteristics between inlet and outlet port of hollow fiber membrane module (Temperature: 30°C, Relative Humidity: 30%RH)

일정한 상대습도 차이를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 0~200 s에서 입·출구의 차이가 전 구간 중에 가장 크게 나타나는 구간으로 출구부에서도 상대습도가 증가함과 동시에 약 50 s 동안 유지하는 것으로 보아 중공사막의 기공에 일부 수분이 흡착되는 구간으로 볼 수 있다.

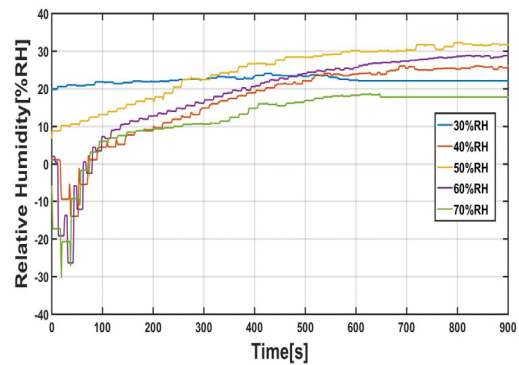
중공사막 모듈의 제습실험결과는 온도별로 나누어 Fig. 7에 나타내었다. 이 실험결과는 중공사막 모듈의 입구와 출구의 상대습도 차이를 계산하여 실험시간에 따라 나타낸 것이다. 중공사막 모듈의 제습실험 결과 20°C와 30°C에서는 입구와 출구에서의 상대습도 차이가 급격히 증가한 후 감소하여 일정한 값을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 입구에서 유입되는 상대습도가 클수록 출구와의 상대습도 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 40°C 조건에서의 실험결과에 나타낸 것과 같이 어느 일정수치를 초과하게 되면 중공사막 모듈의 수분 분리 용량의 초과로 인해 수분 분리 능력이 감소할 수 있으며, 낮은 온도와는 달리 40°C에서는 같은 상대습도라 하더라도 포화할 수 있는 수분의 양이 늘어나기 때문이다. 따라서 상대습도 50%부터는 시간이 지남에 따라 제습효과가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 토대로 본 논문에서 사용된 중공사막의 시간에 따른 제습효과에 대한 용량을 예측할 수 있다.



a) Temperature 20[°C]



b) Temperature 30[°C]



c) Temperature 40[°C]

Fig. 7 Results of dehumidification performance (Temperature: 30°C, Relative Humidity: 30%RH, Porosity: 0.5)

Fig. 8은 중공사막 입구 습공기의 온도가 30°C 조건에서 제습특성실험을 한 후에 중공사에 남아

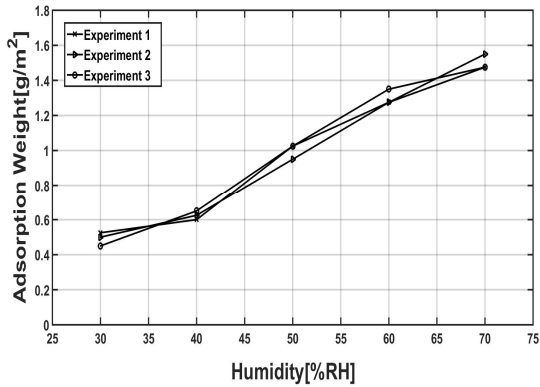


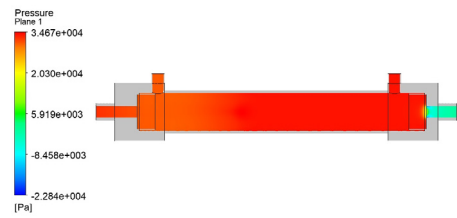
Fig. 8 Results of adsorption weight(Temperature: 30℃, Porosity: 0.5)

있는 수분량을 측정된 결과를 보이는 것이다. 이 결과는 중공사막의 수분 흡착량을 예측할 수 있는 것으로, 입구 습공기의 온도가 30℃일 때의 한예를 기록한 것이다. 중공사막 모듈에 대한 면적단위 수분잔류 무게에 대한 결과 유입되는 습공기의 상대습도가 높을수록 높은 수분잔류 특성을 갖는 것으로 확인되었다.

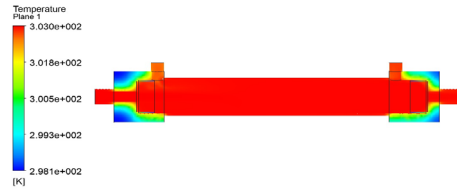
#### 4.2 유동해석 결과

중공사막 유동해석에 대한 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 압력분포와 온도 및 속도분포에 대한 결과로 압력은 출구부로 갈수록 중공사막 기공에 의해 압력부하로 압력이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 속도분포 또한 입구와 출구의 내경이 좁은 구간에서는 높은 속도를 보이고 중공사막 모듈 내부의 주요부품인 중공사막을 통과할 때는 속도가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

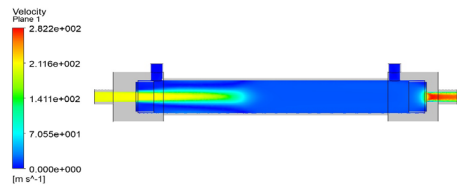
제습실험결과와 동일하게 30℃에서의 30%RH의 조건에서 시간에 따른 입구와 출구의 상대습도를 Fig. 10의 a)에 나타내었다. Fig. 6의 실험결과에서는 실험장치의 관로 영향으로 인하여 입구에서 약 35%의 상대습도가 나타났으나 해석에서는 30%의 상대습도를 고정으로 하여 해석을 수행하였다. 실험과 해석의 오차는 약 2%를 보이는데, 해석에 사용된 중공사막은 실제모델에 비해 작은 수를 사용했기 때문이다.



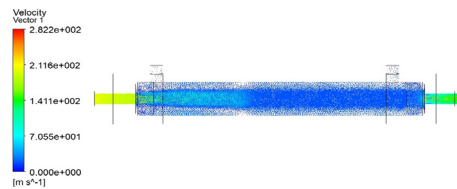
a) Distribution of pressure



b) Distribution of Temperature



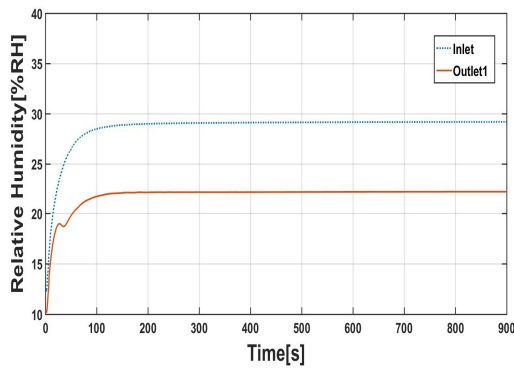
c) Distribution of velocity



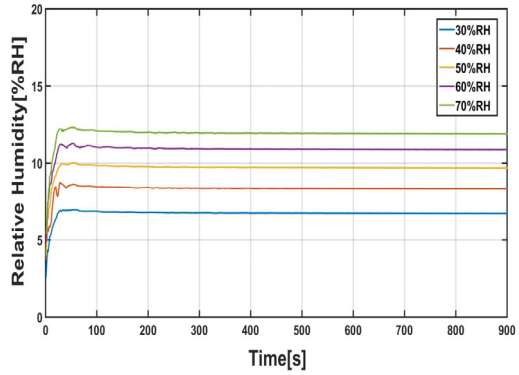
b) Distribution of velocity vector

Fig. 9 Results of flow analysis

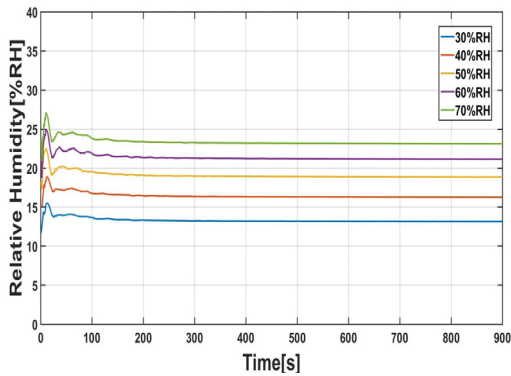
또한 온도별 입구와 출구의 상대습도 차이를 계산하여 Fig. 10의 b), c), d)에 그래프로 나타내었다. Fig. 7의 실험결과와 비교하면 온도가 높아짐에 따라 중공사막 모듈의 입구와 출구의 상대습도 차이가 커져서 효율이 증가하는 것처럼 볼 수 있으나 중공사막 모듈의 최대제습성능은 고정적이기 때문에 각 조건에 따라 출구로 유출되는 건조공기의 수분조성 변화만을 확인할 수 있다. Fig. 10의 실험결과는 Fig. 6에서 나타난 입구의 습도 결과와 마찬가지로 상대습도 30%로 설정된 습공기가 중공사막 모듈의 입구와 연결된 지그에



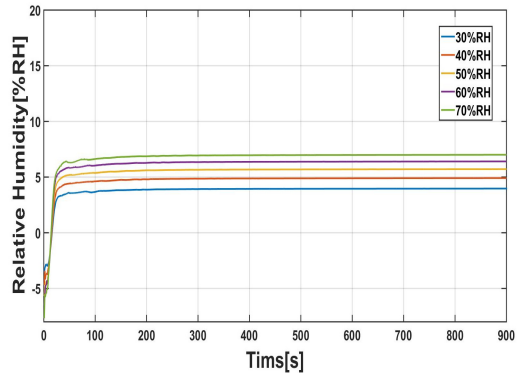
a) Result of CFD(Temperature: 30°C, Relative Humidity: 30%RH)



c) Temperature 30°C



b) Temperature 20°C



d) Temperature 40°C

Fig. 10 Results of CFD about performance of dehumidification

일부 정체됨에 따라 상온의 온도 조건을 가지는 중공사막 모듈의 출구와 연결된 지그보다 빠르게 습도가 증가하여 입구와 출구의 상대습도 차이가 커지는 것으로 볼 수 있다. 해석과정에서는 중공사막 모듈의 입구와 출구부 표면을 계산하여 나타낸 것이기 때문에 실험과정에서도 지그의 영향이 없을 경우 해석결과와 동일하게 온도가 증가함에 따라 입구와 출구의 상대습도 차이가 평균적으로 감소할 것으로 보인다.

Fig. 11은 습공기가 중공사막 모듈의 주요 부품인 중공사막의 기공을 통해 흐르고, 실험시간과 동일하게 해석을 수행하였을 때 수분의 잔류 결과를 나타낸 것으로 온도 30°C에서 입구에 유입

되는 공기의 상대습도는 30%부터 70%까지 해석을 수행한 결과이다. 해석결과, 유입되는 공기의 상대습도가 가장 낮은 30%에서는 실험종료 시간과 동일한 지점에서 중공사막 내에 약 15%의 상대습도를 갖는 수분의 양이 잔류하고 있는 것으로 보이며, 가장 높은 유입공기의 상대습도인 70%에서는 27%의 상대습도를 갖는 수분의 양이 잔류하고 있다. 따라서 수분의 잔류량은 유입공기의 상대습도가 증가함에 따라 비례적으로 증가하며, 초기의 0~50 s 구간에서는 많은 수증기를 기공에 의해 흡착된 후 유입되는 공기의 압력으로 인해 서서히 출구로 빠져나가 일정하게 유지되는 것으로 볼 수 있다.

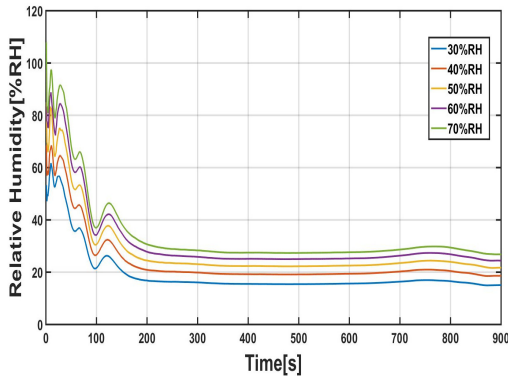


Fig. 11 Results of CFD about performance of dehumidification in hollow fiber membrane (Temperature: 30℃)

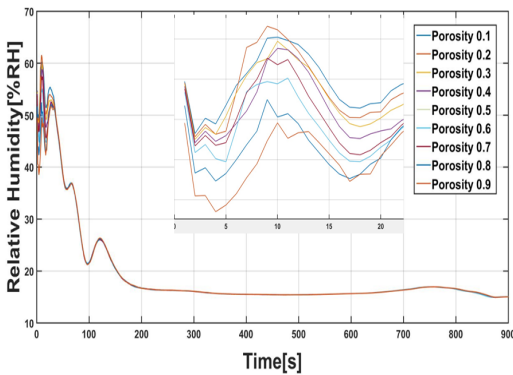


Fig. 12 Results of CFD about performance of dehumidification in hollow fiber membrane (Temperature: 30℃, Porosity: 0.1~0.9)

중공사막 내부의 상대습도를 Fig. 11에 입구온도 30℃를 기준으로 습도가 커짐에 따라서 중공사막이 흡착량이 증가하고 있다.

Fig. 12에서는 30℃의 30%RH 조건일 때의 다공성도에 따른 중공사막의 상대습도를 나타낸 그래프이다. 다공성도가 커짐에 따라 0~30 s 구간에서의 상대습도가 증가하는 것처럼 보이나, 200 s 구간부터는 거의 모든 다공성도에서 유사한 상대습도를 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 중공사막의 수분흡착 특성은 다공성도의 영향보다 입구 습공기의 상대습도에 영향을 크게 받는 것으로 확인되었다. 또한 중공사막 모듈은 재료적인 특성

인 기공률뿐만 아니라 내부의 주요부품인 배플의 영향도 배제할 수 없기 때문에 향후에는 모듈의 형태를 개선하여 배플의 형태와 유무 등에 대한 영향도 분석이 필요하다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 중공사막 모듈의 제습효율을 확인하기 위하여 실험을 수행하였으며, 실험에 사용된 중공사막 모듈의 근사모델을 모델링하여 유동해석을 수행하였다. 유동해석을 통하여 도출된 결과와 실험결과를 비교 분석하였다. 따라서 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 중공사막 모듈의 제습실험결과와 유동해석 결과는 실제모델이 아니기 때문에 정확한 수치보다 시간별 그래프의 특성변위를 비교하고자 하였으며, 시간에 따른 그래프를 확인했을 때 구간별 공기의 수분조성이 비슷한 양상으로 움직이는 것을 확인할 수 있다.

2) 중공사막 모듈의 시험결과에서는 특정 온도와 특정 습도이상일 되었을 때 제습효율이 지속적으로 감소하는 특성을 확인할 수 있으며, 이를 토대로 중공사막 모듈의 제습효율 용량을 예측할 수 있을 것으로 보인다.

3) 중공사막 모듈에 포함된 주요부품인 중공사막에 대한 수분의 잔류특성은 중공사막의 기공의 영향보다 유입되는 습공기의 상대습도에 따라 더 크게 변화하기 때문에 제습효율면에서도 중공사막의 기공이 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예상된다.

4) 본 논문의 결과를 바탕으로 향후에는 다양한 모델을 모델링하여 유동해석을 수행하여 중공사막 모듈의 다양한 형태에 따른 제습특성을 분석할 예정이다.

5) 본 연구에서는 중공사막 모듈에 대한 다양한 조건을 적용하여 실험과 유동해석을 수행하여 유사한 특성을 나타내어 신뢰성 있는 결과를 나타내었으며, 본 연구를 토대로 향후에는 주요부품을 개선하여 제습성능이 향상된 모델을 제시할 예정이다.



## Author contributions

E. A. Jeong; Investigation. K. Y. Lee; Supervision. S. N. Yun; Project administration.

## References

1. S. M. Huang and L. Z. Zhang, "Research and trends in membrane-based liquid desiccant air dehumidification", 2013, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, pp. 425-440. (DOI:10.1016/j.rser.2013.08.005)
2. R. Kaya, G. Deveci, T. Turken, R. Sengur, S. Guclu, D. Y. Koseoglu-lmer and I. Koyuncu, 2014, "Analysis of wall shear stress on the outside-in type hollow fiber membrane modules by CFD simulation", *Desalination*, Vol. 351, pp. 109-119. (DOI:10.1016/j.desal.2014.07.033)
3. C. Ma, Y. Liu, F. Li, C. Shen, M. Huang, Z. Wang, C. Cao, Q. Zhou, Y. Sheng and W. Sand, 2019, "CFD simulations of fiber-fiber interaction in a hollow fiber membrane bundle: Fiber distance and position matters", *Separation and Purification Technology*, Vol. 209, pp. 707-713. (DOI:10.1016/j.seppur.2018.09.029)
4. J. Wang, X. Gao, G. Ji and X. Gu, 2019, "CFD simulation of hollow fiber supported NaA zeolite membrane modules", *Separation and Purification Technology*, Vol. 213, pp. 1-10. (DOI:10.1016/j.seppur.2018.12.017)
5. A. Oueslati and A. Megriche, A. Hannachi and M. Elmaaoui, 2017, "Performance study of humidification-dehumidification system operating on the principle of an airlift pump with tunable height", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 111, pp. 65-74. (DOI:10.1016/j.psep.2017.05.018)
6. S. Saneinejad, P. Moonen, T. Defraeye, D. Derome, and J. Carmeliet, 2014, "Coupled CFD radiation and porous media transport model for evaluating evaporative cooling in an urban environment", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, Vol. 104-106, pp. 455-463. (DOI:10.1016/j.jweia.2012.02.006)
7. B. J. Julian and M. Menendez, 2015, "Gas permeation effect on the Two-Section Two-Zone Fluidized Bed Membrane Reactor(TS-TZFBMR) fluid dynamics: A CFD simulation study", *Chemical Engineering Journal*. (DOI:10.1016/j.cej.2015.08.127)