

공조기 운전 조건이 가습 소자의 성능에 미치는 영향에 대한 실험 연구

김내현
인천대학교 기계공학과

An Experimental Study for the Effect of Operating Condition of the Air Handling Unit on the Performance of Humidifying Elements

Nae-Hyun Kim

Division of Mechanical Engineering, Incheon National University

요약 최근 들어 건물이나 데이터 센터의 공조에 기화식 가습기가 널리 사용된다. 일반적으로 가습 효율은 외기 조건에 관계없이 동일하게 적용된다. 하지만 이 부분에 대해서는 확인이 필요하다. 본 연구에서는 일반 건물과 데이터 센터의 설계 온습도 조건에서 일련의 실험을 수행하고 상기 가정이 적절한지를 판단하였다. 실험에 사용된 소자는 cellulose/PET 재질로 깊이 100mm, 200 mm, 300 mm 세 종류이고 전방 풍속 1.0 m/s에서 4.5 m/s 사이에서 수행되었다. 실험 결과 가습 효율은 외기 조건에 따라 차이가 났다. 데이터 센터 (25°C DBT, 15°C WBT) 조건에서 건물 공조 (35°C DBT, 21°C WBT) 조건보다 크게 나타났는데 그 이유는 입구 영역에서 수분 전달 성능의 차이 때문이다. 심지어 건물 공조 조건에서는 입구 영역에서 제습이 일어났다. 또한 공급수 온도가 외기 공기의 습구온도에 근접할수록 가습 효율이 증가함을 확인하였다. 따라서 가습 소자의 성능을 적절히 예측하기 위해서는 입구 영역에 대한 해석 모델이 포함되어야 한다. 한편 소자의 두께가 100 mm에서 200 mm로 되면 가습효율이 29% 증가하고 300 mm가 되면 42% 증가한다. 하지만 압력 손실도 47%, 86% 증가한다.

Abstract Evaporative humidification using a humidifying element is used widely for the humidification of a building or a data center. The performance of a humidifying element is commonly expressed as the humidification efficiency, which is assumed to be independent of the air temperature or humidity. To verify this assumption, a series of tests were conducted under two air conditions - data center (25°C DBT, 15°C WBT) and commercial building (35°C DBT, 21°C WBT) - using humidifying elements made from cellulose/PET and changing the frontal air velocity from 1.0 m/s to 4.5 m/s. Three samples having a 100 mm, 200 mm, or 300 mm depth were tested. The results showed that the humidification efficiency is dependent on the air condition. Indeed, even dehumidification occurred at the inlet of the humidifying element at the air condition of commercial building. This suggests that a proper thermal model should account for the inlet area, where the amount of moisture transfer may be different from the other part of the humidification element. As the depth of the element increased from 100 mm to 200 mm, the humidification efficiency increased by 29%. With further increases to 300 mm, it increased by 42%. On the other hand, the pressure drop also increased by 47% and 86%.

Keywords : Humidifying Element, Humidification Efficiency, Air-Handling Unit, Data Center, Cellulose/PET

1. 서론

최근 들어 산업의 발달과 산업구조의 변화로 현대인

들이 대부분의 시간을 실내 거주 공간 및 사무실에서 보내고 있음을 고려할 때 쾌적한 실내 공기환경을 제공하는 것은 매우 중요하다. 건물 내 공기조화는 공조기를 통

*Corresponding Author : Nae-Hyun Kim(Incheon National Univ.)

Tel: +82-32-835-4541 email: knh0001@incheon.ac.kr

Received August 2, 2018

Revised August 21, 2018

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

하여 이루어지는데 공조기에는 온도 조절을 위하여 냉난방 코일, 습도 조절을 위하여 가습기가 설치된다. 공조기에 설치되는 가습기는 기화식, 분무식, 스팀식으로 구별된다. 이 중 기화식 가습기는 부하 변동에 대해 다소 느리게 반응하는 단점이 있으나 초기투자비 및 유지비가 저렴한 장점이 있다. 또한 오염물질을 제거하는 기능도 있어 클린룸과 같이 공기청정도가 필요한 건물에 많이 사용되고 있다[1].

기화식 가습기는 Fig. 1에 보여지듯이 가습소자와 상부의 유량 공급 노즐로 구성된다. 상부의 노즐에서 공급된 물은 가습소자를 적시고 공기가 소자 사이를 통과하며 가습이 이루어진다. 따라서 가습소자의 재질로는 노즐로부터 분사된 물이 소자 전체를 잘 적실 수 있는 특성을 가지는 것이 중요하다. 그간 가습소자로 검토된 재질은 크게 유리섬유(Glasswool), 세라믹, PVC 스폰지, 와이어 매쉬와 같은 무기질재료와 크라프트 섬유, 아스펜 섬유, 코코넛 섬유와 같은 유기질 셀룰로오스 재료로 구별된다[2-5]. 이중 공조용으로는 Munters사에서 상용화한 유리섬유로 만든 Glasdek[6]이 널리 사용되고 있다. 최근들어 Kim[7]은 Glasdek의 성능을 증가하는 새로운 가습 소자를 제시하였다. 신규 가습 소자는 셀룰로오스와 PET가 50%씩 배합된 재질로 Fig. 1에 보여지듯이 가습 면적을 증가시키기 위하여 절곡 깊이를 Glasdek의 7 mm에서 5 mm로 감소시켰고 차압 손실을 줄이기 위하여 채널을 수평으로 하였다. 신규 소자는 Glasdek에 비하여 가습 효율이 44% 크고 압력 손실은 10% 작게 나타났다.

절곡 채널이 교차 적층된 형상의 수분전달에 대해서는 일부 연구가 수행되었다. Franco et al.[8]은 절곡각이 건표면 열전달 및 습표면 수분전달에 미치는 영향을 수치해석 및 실험을 통하여 검토하였다. 수치해석 결과는 건표면 데이터는 잘 예측하나 습표면의 데이터는 잘 예측하지 못하였다. Malli et al.[9]은 소자의 길이가 수분전달에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였는데 소자 길이가 증가할수록 수분 전달량 및 압력손실이 증가하였다. Barzegar et al.[2]은 절곡 깊이가 수분 전달에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였는데 절곡 깊이가 증가할수록 수분 전달량 및 압력손실이 증가하였다.

통상적으로 가습 소자의 성능은 식 (1)로 정의되는 가습 효율 (ξ) 로 나타낸다.

$$\xi = \frac{W_{out} - W_{in}}{W_{sat} - W_{in}} \quad (1)$$

여기서 W_{out} 은 소자 출구에서의 절대습도 W_{in} 은 소자 입구에서의 절대습도, W_{sat} 은 입구 습구 온도에서의 포화 절대습도이다. 일반적으로 가습 효율은 외기 조건에 관계없이 동일하게 적용된다. 하지만 이 부분에 대해서는 확인이 필요하다. 현재 가습 소자는 일반 건물과 데이터 센터의 공조에 널리 사용되고 있으므로 두 설계 외기 조건에 대하여 일련의 실험을 수행하고 상기 가정이 적절한지를 확인하고자 한다.

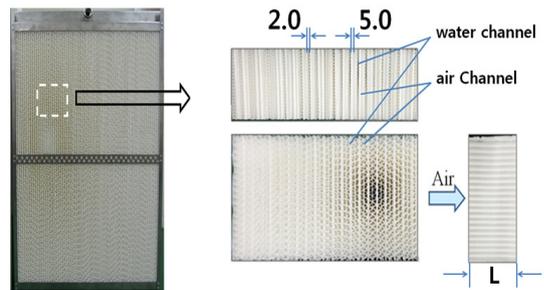


Fig. 1. Photo of the cellulose/PET humidifying element

2. 가습 소자

본 연구에서 사용한 시료는 Fig. 1에 나타나 있듯이 절곡 깊이가 5 mm인 수평 공기 채널이 절곡 깊이가 2 mm인 수직 물 채널과 직각되게 교차로 적층되어 있다. 여기서 물 채널은 공기 채널에 물을 골고루 공급하여 주는 역할을 한다. 소자의 외각크기는 폭 620 mm, 높이 570 mm로 실험 장치가 허용하는 한 최대로 하였다. 시료는 깊이 100 mm, 200 mm, 300 mm 세 종류를 제작하였다. Fig. 2에 원단의 SEM사진을 나타내었는데 20 μ m가량의 굵은 PET에 가는 셀룰로오스 섬유가 서로 얽혀 있음을 보여준다. 여기서 PET는 견고한 지지체 역할을 하여 절곡된 형상을 유지하고 셀룰로오스는 물이 잘 퍼지도록 하는 역할을 한다. 원단의 두께는 180 μ m, 밀도는 429 kg/m³이다.

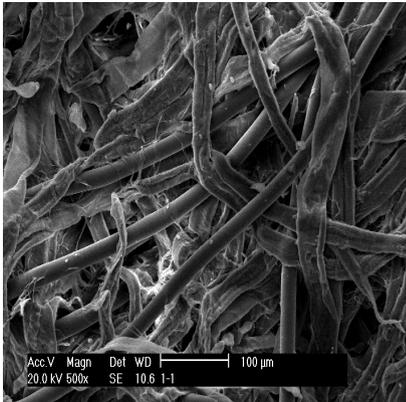


Fig. 2. SEM photo of the cellulose/PET material

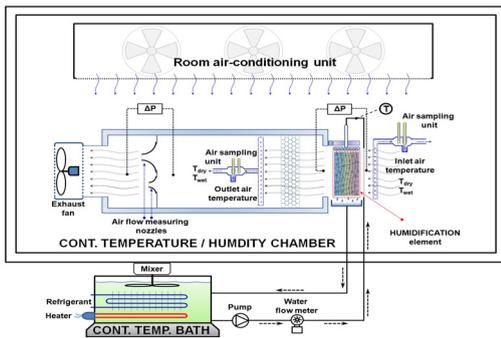


Fig. 3. Experimental apparatus

3. 실험 장치 및 방법

실험장치의 개략도가 Fig. 3에 나타나 있다. 실험장치는 크게 흡입식 풍동, 수순환 회로, 자료획득장치 등으로 구성되고 항온항습 챔버 내에 설치된다. 가습소자는 흡입식 풍동의 입구에 설치된다. 시료 후방에는 배플이 설치되어 배출공기를 혼합시켜준다. 시료의 입출구 온습도는 ASHRAE 규격 41.1에 따라 측정하였다[10]. 시료의 상부로 항온조로부터 일정온도와 유량의 물이 공급된다. 물의 온도는 정밀도 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 의 정밀 RTD(Pt-100 Ω 센서)로써 측정하였고, 유량은 정밀도 $\pm 0.2\%$ 의 질량유량계로 측정하였다. 공기측 풍량은 흡입식 풍동 후방에 장착된 노즐을 사용하여 측정하였고 (ASHRAE 규격41.2[11]) 시료의 압력손실은 정밀도 ± 0.5 Pa의 차압 트랜스듀서로 측정하였다. 시험은 건물 공조 (35°C DBT, 21°C WBT)와 데이터 센터 (25°C DBT, 15°C WBT) 조건에서 시료 전방풍속을 1.0 m/s에서 4.5 m/s 사이에서 변화

시키며 수행하였다. ASHRAE 규격 41.5[12]에 따라 실험오차 해석을 수행하였는데 차압손실의 오차는 $\pm 5.4\%$, 가습효율의 오차는 $\pm 12.2\%$ 로 나타났다. 차압손실의 오차는 주로 차압계(± 0.5 Pa)에 의한 것이었고, 가습효율의 오차는 주로 습구온도의 측정오차($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)에 기인하였다. 실험오차는 전방풍속이 증가할수록 감소하였다.

4. 결과 및 고찰

가습소자의 성능을 최대 발휘하기 위해서는 소자가 충분히 젖는 것이 중요하다. 동시에 필요 이상의 물은 낭비되므로 소자를 충분히 적실 수 있는 최소 수량을 공급할 필요가 있다. 물은 소자 상부 5 cm 위치에 설치된 외경 16.0 mm의 PVC 원관 헤더로부터 공급되었다. 균일한 물 공급을 위하여 헤더에는 직경 2.0 mm 구멍이 6 cm 간격으로 가공되었는데 물은 헤더의 중앙 위치에 수직 방향으로 유입되었다. 아울러 헤더 하부에는 부직포를 설치하여 물이 소자에 고르게 퍼지도록 하였다. 물이 유출되는 구멍의 크기와 간격은 실험을 통하여 구하였다. Fig. 4에 본 연구에 사용된 직경 2.0 mm 구멍이 6 cm 간격으로 가공된 헤더에서 공급 유량에 따른 유량 분포를 나타내었다. 물은 헤더의 중앙(4번과 5번 구멍 사이)으로 공급되었고 각 구멍에서의 유량은 구멍 아래에 매스 실린더를 놓고 1분 동안 누적 계측하였다. 공급 유량은 0.8 lpm (liter per minute)에서 2.0 lpm 사이에서 변화되었는데 Fig. 4는 모든 유량에서 유량 분포가 최외각의 두 구멍(1번과 8번)을 제외하고는 균일함을 보여준다. 최외곽 구멍에서는 유량이 다른 구멍에 비하여 대체로 감소하였는데 이는 헤더 말단의 벽면에 의한 영향으로 판단된다. 하지만 일부 유량에서는 (예를 들면 8번 구멍에서 0.8 , 1.2 와 2.0 lpm의 경우) 말단에서도 유량이 감소하지 않음을 보이는데 이는 헤더가 완벽하게 수평을 이루고 있지 않아 8번 구멍 쪽으로 유량이 쏠린 때문으로 판단된다.

Fig. 5에 공급 수량 변화에 따른 가습 효율을 나타내었다. 이 때 전방 풍속은 2.0 m/s, 공급수의 온도는 10°C 이고 건물 공조 (35°C DBT, 21°C WBT) 조건이었다. 이 그림은 모든 소자에서 공급 수량 0.8 lpm 이상이면 효율이 일정하게 나타남을 보여준다. 또한 육안으로도 0.8 lpm 이상에서는 가습소자가 충분히 젖는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 6에 두께 100 mm 소자에서 전방 풍속을 1.0 m/s에서 4.5 m/s로 변화시키며 측정된 가습 효율은 나타내었다. 이 때 공급수의 온도는 10°C로 유지되었다. 가습 효율은 풍속이 증가할수록 감소하는 경향을 보이는데 이는 풍속이 증가할수록 공기와 소자가 접촉할 수 있는 시간이 감소하기 때문이다. 한편 가습 효율은 외기 조건에 따라 달라짐을 보인다. 데이터 센터 (25°C DBT, 15°C WBT) 조건에서 건물 공조 (35°C DBT, 21°C WBT) 조건보다 평균 27% 크게 나타났다.

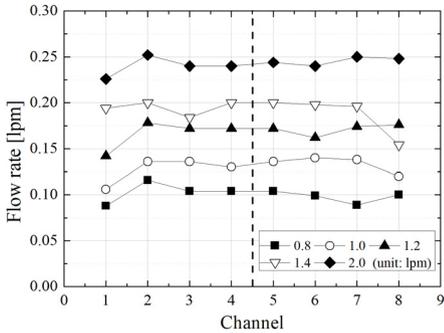


Fig. 4. Flow distribution at the header pipe

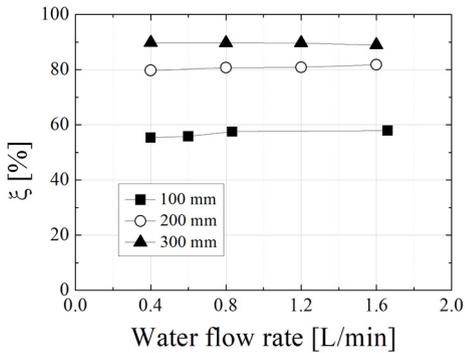


Fig. 5. Humidification efficiency vs. water flow rate

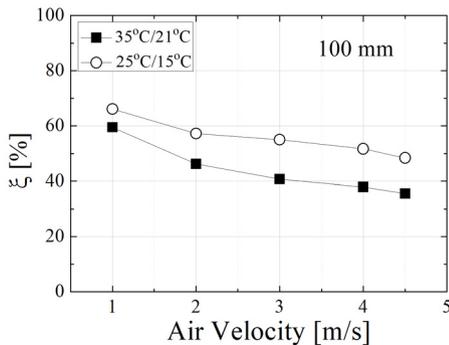


Fig. 6. Humidification efficiency (100 mm depth)

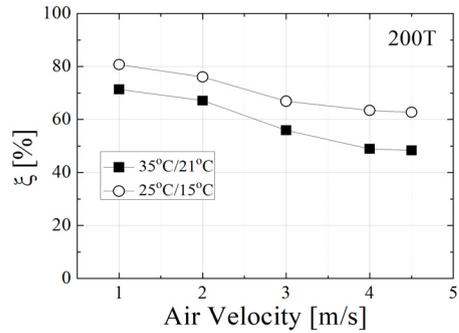


Fig. 7. Humidification efficiency (200 mm depth)

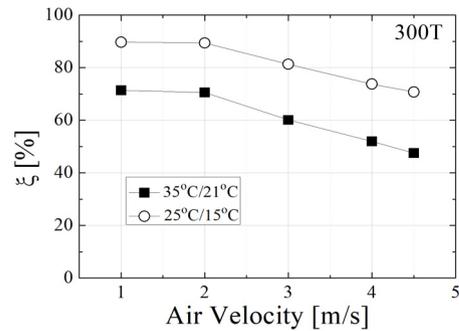


Fig. 8. Humidification efficiency (300 mm depth)

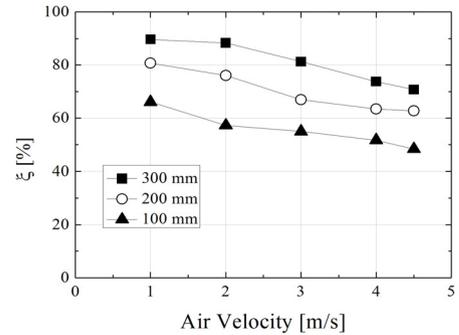


Fig. 9. Humidification efficiency (25°C/15°C, 10°C water)

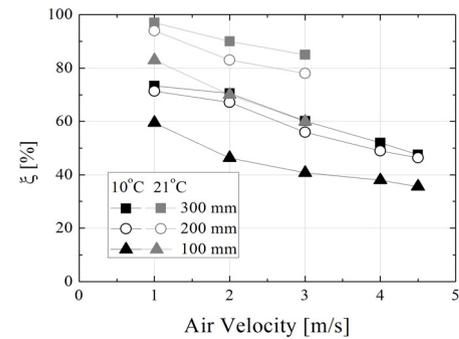


Fig. 10. Humidification efficiency (35°C/21°C)

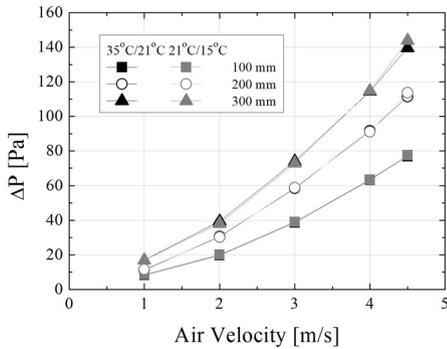


Fig. 11. Pressure drops of the samples

Fig. 7과 8에 동일한 조건에서 200 mm와 300 mm 소자에 대해 실험한 결과를 나타내었다. 100 mm 경우와 마찬가지로 데이터 센터 (25°C DBT, 15°C WBT) 조건에서 건물 공조 (35°C DBT, 21°C WBT) 조건보다 크게 나타났는데 200 mm 소자의 경우는 평균 21%, 300 mm 소자의 경우는 평균 33% 크게 나타났다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 가습 효율은 일반적으로 소자 표면 물의 온도가 유입 공기의 습구온도(W_{sat})와 같다고 가정하여 계산한다. 이 가정은 소자의 크기가 매우 크면 타당하다. 왜냐하면 유입된 물은 소자표면을 흐르면서 공기와 열 및 수분교환을 하고 종국에는 공기의 습구온도가 될 것이기 때문이다. 즉, 유입된 물의 온도가 공기의 습구온도로 되기까지는 일정한 길이가 필요한데 만일 소자의 크기가 충분히 크다면 이 입구 길이는 전체 길이에 비해 무시할 만하고 따라서 식 (1)이 타당하게 된다. 하지만 소자 길이가 짧은 경우에는 입구 길이가 영향을 미치고 식 (1)의 가습 효율식은 오차를 수반하게 된다.

본 연구의 데이터 센터 (25°C DBT, 15°C WBT) 조건을 살펴보면 입구 공기의 절대 습도는 0.00686 kg/kg_{air}이고 10°C 물의 포화 절대 습도는 0.00762 kg/kg_{air}이다. 따라서 입구 영역에서 물의 포화 절대 습도가 공기의 절대 습도보다 크므로 공기 방향으로 수분 전달(공기 가습)이 일어나게 된다. 건물 공조 (35°C DBT, 21°C WBT) 조건에서는 입구 공기의 절대 습도는 0.00936kg/kg_{air}이다. 이 값은 10°C 물의 포화 절대 습도 0.00762 kg/kg_{air}보다 크므로 입구 영역에서 공기에서 물로 수분 전달(공기 제습)이 일어난다. 따라서 가습효율은 데이터 센터 (25°C DBT, 15°C WBT) 조건보다 감소하게 된다.

Fig. 9에 데이터 센터 (25°C DBT, 15°C WBT) 조건

에서 소자의 두께에 따른 가습 효율을 나타내었다. 이 때 물 온도는 10°C로 유지되었다. 소자의 두께가 100 mm에서 200 mm로 되면 가습효율이 평균 26% 증가하고 300 mm가 되면 평균 45% 증가함을 보여준다. Fig. 10에는 건물 공조 (35°C DBT, 21°C WBT) 조건에서 소자의 두께에 따른 가습 효율의 변화를 보여준다. 소자가 100 mm에서 200 mm로 되면 가습효율이 평균 32% 증가하고 300 mm가 되면 평균 38% 증가한다. Fig. 10에는 Kim[7]이 측정된 물 온도 21°C 데이터도 나타나 있다. 풍속 1.0 m/s에서 3.0 m/s 범위에서 측정이 수행되었는데 본 연구의 물 온도 10°C 데이터에 비하여 가습 효율이 100 mm에서 45%, 200 mm에서 31%, 300 mm에서 33% 크게 나타났다. 이는 21°C 물의 경우 포화 절대 습도가 0.01564 kg/kg_{air}로 입구 공기의 절대 습도 0.00936kg/kg_{air}보다 커서 소자 전체에 걸쳐 가습이 일어나기 때문이다. 상기 논의로부터, 가습 소자의 성능을 적절히 예측하기 위해서는 물 온도가 공급 온도에서 습구 온도로 변해가는 입구 영역의 해석이 중요함을 알 수 있다. 입구 영역의 해석에는 소자의 형상, 크기, 공기 건습구 온도, 풍속, 물 유량 등이 고려되어야 할 것이다.

Fig. 11에는 소자의 압력손실을 나타내었다. 압력 손실은 공기의 온도 조건에는 무관함을 보여준다. 소자의 두께가 100 mm에 비하여 200 mm에서 평균 47%, 300 mm에서 평균 86% 압력손실이 크게 나타났다.

5. 결론

기화식 가습기 설계시 가습 효율은 외기 조건에 관계 없이 동일하게 적용된다. 하지만 이 부분에 대해서는 확인이 필요하다. 본 연구에서는 일반 건물과 데이터 센터의 설계 온습도 조건에서 일련의 실험을 수행하고 상기 가정이 적절한지를 판단하였다. 실험에 사용된 소자는 cellulose/PET 재질로 길이 100mm, 200 mm, 300 mm 세 종류이다. 실험은 전방 풍속 1.0 m/s에서 4.5 m/s 사이에서 수행되었다. 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) 가습 효율은 외기 조건에 따라 차이가 났다. 데이터 센터 (25°C DBT, 15°C WBT) 조건에서 건물 공조 (35°C DBT, 21°C WBT) 조건보다 크게 나타났다. 그 이유는 입구 영역에서 수분 전달 성능의 차이 때문이다. 심지어 건물 공조 조건에서

는 입구 영역에서 제습이 일어난다.

- (2) 또한 공급수 온도가 공기의 습구온도에 근접할수록 가습 효율이 증가함을 확인하였다. 따라서 가습 소자의 성능을 적절히 예측하기 위해서는 입구 영역에 대한 해석 모델이 포함되어야 한다.
- (3) 소자의 두께가 100 mm에서 200 mm로 되면 가습 효율이 29% 증가하고 300 mm가 되면 42% 증가한다. 하지만 압력 손실도 47%, 86% 증가한다.

Behraves, "Investigating the performance of cellulosic evaporative cooling pads", *Energy Conversion and Management*, Vol.52, No.7, pp.2598-2603, 2011.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.015>

- [10] ASHRAE Standard 41.1, Standard method for temperature measurement, ASHRAE, 1986.
- [11] ASHRAE Standard 41.2, Standard method for laboratory air-flow measurement, ASHRAE, 1986.
- [12] ASHRAE Standard 41.5, Standard measurement guide, engineering analysis of experimental data, ASHRAE, 1986.

References

- [1] H. K. Kim, T. I. Ohm, H. K. Yoon, K. Y. Bang, "Numerical Study on the Humidification Efficiency on Humidifying Module Shapes of the Evaporative Humidifier", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.26, No.1, pp.42-47, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2014.26.1.042>
- [2] M. Barzegar, M. Layeghi, G. Ebrahimi, Y. Hamseh, M. Khorasani, "Experimental evaluation of the performances of cellulosic pads made out of Kraft and NSSC corrugated papers as evaporative media", *Energy Conversion and Management*, Vol.54, No.1, pp.24-29, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.09.016>
- [3] J. K. Jain, D. A. Hindoliya, "Experimental performance of new evaporative cooling pad materials", *Sustainable Cities and Society*, Vol.1, No.4, pp.252-256, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2011.07.005>
- [4] C. M. Liao, S. Singh, T. S. Wang, "Characterizing the performance of alternative evaporative cooling pad media in thermal environmental control applications", *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, Vol.33, No.7, pp.1391-1417, 1998. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/10934529809376795>
- [5] C. M. Liao, K. H. Chiu, "Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region", *Building and Environment*, Vol.37, No.2, pp.177-187, 2002. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00098-6](https://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00098-6)
- [6] <https://www.munters.com/ko/munters/products/coolers-humidifiers/glasdek/>
- [7] N. H. Kim, "A Performance Analysis and Experiments on Plastic Film/Paper Humidifying Elements Consisting of Horizontal Air Channels and Vertical Water Channels", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B.*, Vol.40, No.1, pp.55-63, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.1.055>
- [8] A. Franco, D. L. Valera, A. Pena, A. M. Pérez, "Aerodynamic analysis and CFD simulation of several cellulose evaporative cooling pads used in Mediterranean greenhouses", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.76, No.2, pp.218-230, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2011.01.019>
- [9] A. Malli, H. R. Seyf, M. Layeghi, S. Shariffian, H.

김 내 현(Nae-Hyun Kim)

[정회원]



• 1989년 12월 : Penn. State University Pennsylvania, PA, U.S.A (공학박사)

• 1994년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

열전달, 공기조화 및 내용