

셀룰로오스와 PET 복합체로 만들어진 가정용 가습소자

김내현*

¹인천대학교 기계시스템공학부

Residential Humidifying Element Made of Cellulose and PET Composite

Nae-Hyun Kim^{1*}

¹Division of Mechanical System Engineering, Incheon National University

요약 실내의 습도제어를 위하여 가습기가 필요하다. 이 중 기화식 가습기는 구조가 간단하고 에너지 소모가 적은 장점이 있다. 하지만 가습기의 핵심 부품인 소자는 일본 제품이 사용되고 있다. 본 연구에서는 일본 제품을 대체할 셀룰로오스와 PET 복합체로 만들어진 가습소자를 개발하고 일본 제품의 성능과 비교하였다. 시험은 소자를 항온항습실 내에 설치된 흡입식 풍동 입구에 설치하고 가습량과 압력손실을 측정하였다. 개발품의 가습 효율이 일본 제품에 비하여 2%~4% 우수하고 압력 손실도 일본 제품에 비하여 23%~32% 적게 나타났다. 또한 동일 압력손실에서 가습 성능을 의미하는 j_m/f 의 값도 개발품에서 5%에서 28% 크게 나타났다. 한편 개발품의 물 흡수도는 일본 제품에 비하여 작게 나타났는데 향후 이 부분에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

Abstract Humidifiers are used to control indoor humidity. Element-type humidifiers have the advantages of simple structure and low energy consumption, and Japanese products have been widely used for the humidifying elements. In this study, a new humidifying element made of cellulose and PET was developed, and the performance was compared with that of a Japanese element. The mass transfer rates and pressure drops were measured for an element installed at the entrance of a suction-type wind tunnel. The humidification efficiency of the new element was 2 to 4% greater and the pressure drop was 23 to 32% smaller compared to the Japanese element. The mass transfer effectiveness (j_m/f) of the new element is also 5 to 28% higher. However, the water absorption capacity was smaller than that of the Japanese element, meaning further development is needed.

Keywords : Cellulose, Humidifying element, PET(Polyethylene Terephthalate), Performance test

1. 개요

산업의 발달과 산업구조의 변화로 현대인들은 대부분의 시간을 실내 거주 공간 및 사무실에서 보내고 있음을 고려할 때 쾌적한 실내공기환경을 제공하는 것은 매우 중요하다. 실내공기 환경을 결정하는 가정 주된 인자는 온도와 습도이다. 그중 온도제어에 대해서는 많은 연구가 이루어졌고 설비 또한 다양하게 개발되어 있는 반면 습도의 제어는 상대적으로 취약한 편이다. 예를 들어, 거

울철의 경우 쾌적한 실내 온도 및 상대습도 조건은 17°C ~28°C, 40%~70%인데 온도는 조절하기 쉬우나 습도는 상대적으로 조절이 쉽지 않다. 만일 습도 조건을 만족시키지 못하여 건조한 상태가 되면 재실자가 호흡기 질환, 피부질환 등에 노출되게 된다.

가정용 가습기는 초음파식, 가열식, 기화식, 복합식으로 구별된다. 그간 초음파식 가습 방법이 이 널리 사용되었지만 초음파식은 물 속의 세균까지 공기 중으로 비산시키는 문제가 있어 소비자들로 외면받게 되었다 [1]. 기

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

Tel: +82-10-3315-8902 email: knh0001@incheon.ac.kr

Received January 22, 2016

Revised February 17, 2016

Accepted April 7, 2016

Published April 30, 2016

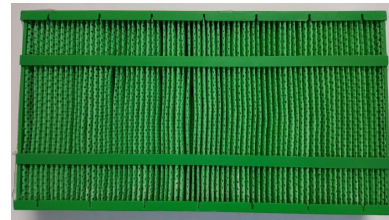
화식은 구조가 간단하고 에너지 소모가 적어 가정용 가습기에 널리 사용되고 있다. 하지만 다른 가습 방법에 비해 가습량이 적고 웬 소음이 큰 단점이 있다 [2].

Fig. 1에 가정용 가습기 사진을 수록하였다. 가습소자 하부의 물통에서 가습소자로 물이 공급된다. 소자 하부를 적신 물은 소자의 모세관력에 의하여 상부로 공급되고 공기는 소자를 통과하며 가습된다. 따라서 가습소자는 흡수성이 매우 중요하다. 그간 가습소자로 검토된 재질로는 크게 유리섬유, 세라믹, 합성섬유와 같은 무기질 재료와 크라프트 섬유, 아스펜 섬유, 코코넛 섬유와 같은 유기질 셀룰로오스 재료가 있다 [3-6]. 이 중 가정용 가습소자의 재료로는 합성섬유로 만든 부직포가 널리 사용되고 있다.

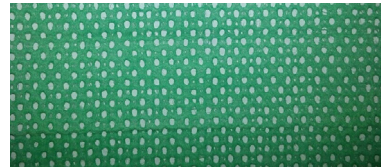


Fig. 1. Photo of the residential humidifier with humidifying element

Fig. 2에는 국내 W사의 가습기에 사용되는 가습소자의 사진을 나타내었다. 이 가습소자는 일본 제품으로 레이온 90%와 폴리에스터 10% 조성의 합성 섬유 부직포를 반복 절곡하여 제조된다. Fig. 2에는 부직포의 평면 사진도 나타나 있는데 직경 2 mm 구멍이 4 mm x 5 mm 핏치로 가공되어 있음을 보여준다. 가습소자로 공급된 공기는 부직포 사이를 통과하며 가습된다. 본 연구에서는 일본 제품의 성능을 능가할 수 있는 새로운 가습소자를 개발하였다. 이 가습소자의 재질은 셀룰로오스와 PET가 50%씩 배합된 복합 소재이다. 개발된 소재를 사용하여 기존의 형상과는 달리 삼각 채널 형상의 가습소자를 만들고 기존 제품과 가습성능을 비교하였다. 실험은 전방풍속을 변화시키며 수행되었다. 삼각 채널은 가습, 제습, 냉각, 가열 등 열 및 수분 교환에 널리 사용되는 형상이다 [7-9].



(a) Japanese humidifying element



(b) Japanese element material



(c) New humidifying element



(d) Channel shape of the new element

Fig. 2. Japanese and newly developed humidifying elements

2. 실험장치와 방법

2.1 가습소자 시료

Fig. 2에 나타난 시료의 외각크기는 일본 제품과 개발품 모두 폭 220 mm, 높이 120 mm, 깊이 26 mm이다. 일본 제품은 두께 0.5 mm의 원단을 3.1 mm 핏치로 절곡하여 제조되었고 개발품은 두께 0.18 mm 원단을 높이 2.2 mm, 핏치 5.0 mm의 삼각 채널 형상으로 성형, 적층하여 제작하였다.

Fig. 3에 개발품의 원단의 SEM사진을 나타내었다. Fig. 3은 20 μ m 가량의 굵은 PET에 가느다란 셀룰로오스 섬유가 서로 얽혀 있음을 보여준다. 여기서 PET는 견고한 지지체 역할을 하여 성형된 형상을 유지하고 셀룰로오스는 물이 잘 퍼지도록 하는 역할을 한다.

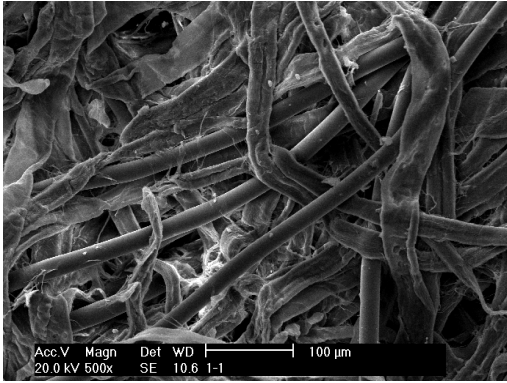


Fig. 3. SEM photo of the new product

2.2 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도가 Fig. 4에 나타나 있다. 실험장치는 크게 흡입식 풍동, 물 공급 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]. 소자 하부에는 물 받침대가 있어 이로부터 소자에 물을 공급한다. 실험 중 가습이 되면 물 받침대의 물은 감소하게 되는데 항온조로부터 일정온도의 (입구 공기의 습구온도인 10.9°C) 보충수를 공급함으로써 물의 수위를 일정한 계 (소자 위 5 mm) 유지하였다.

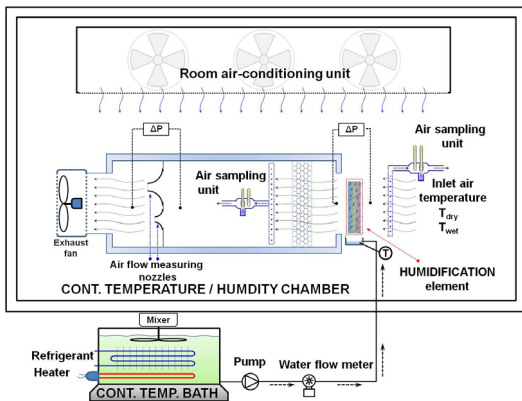


Fig. 4. Experimental apparatus

물의 온도는 정밀도 ±0.1°C의 정밀 RTD(Pt-100Ω 센서)로써 측정하였다. 공기측 풍량은 흡입식 풍동 후방에 장착된 노즐을 사용하여 측정하였고 (ASHRAE 규격 41.2)[11] 시료의 압력손실은 정밀도 ± 0.5 Pa의 차압 트

랜스듀서로 측정하였다. 시험 중 챔버의 온습도와 순환수의 공급 온도는 Table 1에 나타나 있다 [12]. 실험은 시료 전방풍속을 1.0 m/s에서 2.0 m/s 사이에서 변화시키며 수행하였다. ASHRAE 규격 41.5 [13]에 따라 실험 오차 해석을 수행하였고 그 결과가 Table 2에 나타나 있다. 마찰계수의 오차는 주로 차압계(±0.5 Pa)에 의한 것이었고, 물질전달계수의 오차는 주로 습구온도 측정오차 (±0.1°C)에 기인하였다. 실험오차는 전방풍속이 증가할수록 감소하였다.

Table 1. Test condition

Air		Water
Dry bulb (°C)	Wet bulb (°C)	Inlet temp. (°C)
20	10.9	10.9

Table 2. Experimental errors

Parameter	Max. Uncertainties
Temperature	± 0.1°C
Differential pressure	± 0.5Pa
V	± 2.0%
f	± 5.4%
jm	± 12.2%

실험 자료는 다음과 같이 정리되었다. 가습소자의 가습효율은 식 (1)로 정의된다.

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

여기서 W_{in} 과 W_{out} 은 가습소자 전후의 절대습도, W_{sat} 은 입구공기의 포화 절대습도이다. 가습소자를 통과한 공기 중의 수분량 \dot{m}_w (kg/s)은 다음과 같다.

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{air} (W_{out} - W_{in}) \quad (2)$$

여기서 \dot{m}_{air} 는 공기유량(kg/s)이다. 가습소자 표면으로부터 공기로 전달된 수분량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_w = h_D A W_{LMTD} \quad (3)$$

$$W_{LMTD} = \frac{(W_{sat} - W_{in}) - (W_{sat} - W_{out})}{\ln \left(\frac{W_{sat} - W_{in}}{W_{sat} - W_{out}} \right)} \quad (4)$$

여기서 h_D 는 물질전달계수($\text{kg/m}^2\text{s}$)이고 A 는 가습소자의 표면적(m^2), W_{sat} 는 가습소자 표면온도에서의 포화 절대습도로 유입공기의 습구온도에서의 값과 동일하다. 참고로 일본 제품의 표면적 (A)은 0.37 m^2 이고 개발품의 값은 0.60 m^2 으로 개발품의 표면적이 60% 크다.

물질 전달계수 h_D 는 아래와 같이 Colburn j_m 인자로 무차원화 된다.

$$j_m = \frac{h_D}{\rho V_{\max}} Sc^{2/3} \quad (5)$$

여기서 V_{\max} 는 가습소자 중심에서의 공기유속 (m/s)을 나타내고 Sc 는 Schmidt수로 공기와 수증기 혼합물의 경우 0.61이다 [14]. 마찰계수 f 는 다음 식에서 구한다.

$$f = \frac{A_c}{A} \left[\frac{\rho_m}{\rho_{in}} \frac{2\Delta P \rho_{in}}{(\rho_m V_{\max})^2} - (1 + \sigma)^2 \left(\frac{\rho_{in}}{\rho_{out}} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

여기서 A_c 는 가습소자 중심부에서의 유동단면적 (m^2), A 는 시료의 표면적 (m^2), ρ_{in} , ρ_{out} , ρ_m 은 입구, 출구, 중심부에서의 공기밀도 (kg/m^3), σ 는 축소계수로 유동 단면적을 전방면적으로 나누어 구한다.

3. 결과 및 논의

Fig. 5에 일본 제품 및 개발품에 대하여 전방 풍속에 따른 가습 효율 (η_m)이 나타나 있다. 이 그림은 개발품의 가습 효율이 일본 제품에 비하여 2%~4% 우수함을 보여준다. Fig. 6에는 전방풍속에 따른 압력 손실 (ΔP)이 나타나 있다. 이 그림은 개발품의 압력 손실이 일본 제품에 비하여 23%~32% 적음을 보여준다. 즉, 동일한 전방면적과 깊이에서 개발품이 가습 효율과 압력 손실 모두에서 우수함을 알 수 있다. 한 가지 유의할 사항은 전술한 바와 같이 개발품의 표면적이 일본 제품보다 60% 크다는 것인데 이는 원단이 60% 더 소용된다는 의미이다. 개발품의 경우 표면적이 크면서도 가습 효율과 압력 손실 면에서 우수한 것은 원단 자체의 가습 특성과 소자 형상의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 이를 살펴 보기 위하여 소자의 가습 효율과 압력 손실로부터 식 (3)과 식 (6)을 사용하여 물질전달계수와 마찰계수를 도출하였다.

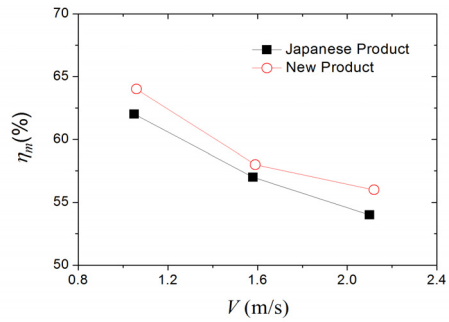


Fig. 5. Humidification efficiency of the two samples

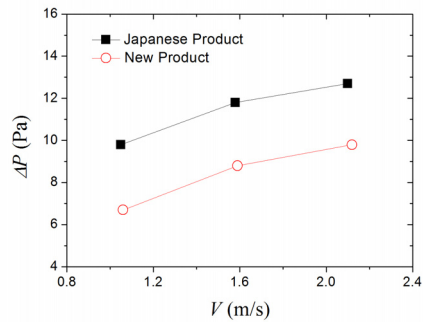


Fig. 6. Pressure drop of the two samples

Fig. 7에 전방풍속에 따른 물질전달계수 h_D 의 값이 나타나 있다. 이 그림은 일본 제품의 h_D 가 30%~62% 큼을 보여준다. 그 이유로 원단의 가습특성과 소자 형상의 차이를 생각할 수 있다. 우선 원단의 가습 특성을 살펴보기 위하여 컵에 붉은 염색물을 5 mm 높이로 채우고 개발품과 일본 제품의 원단 시료를 담가 물을 흡수하는 정도를 시간에 따라 측정하였다 (Fig. 8 참조). 일본 원단의 경우 꼭대기 까지 물을 흡수하는데 240 초가 걸린 반면 개발품 원단의 경우는 300 초로 일본 원단의 흡수력이 우수함을 알 수 있다.

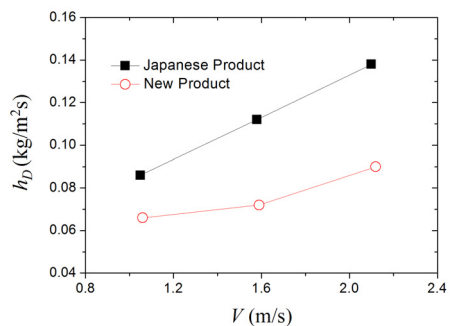


Fig. 7. Mass transfer coefficients of the two samples

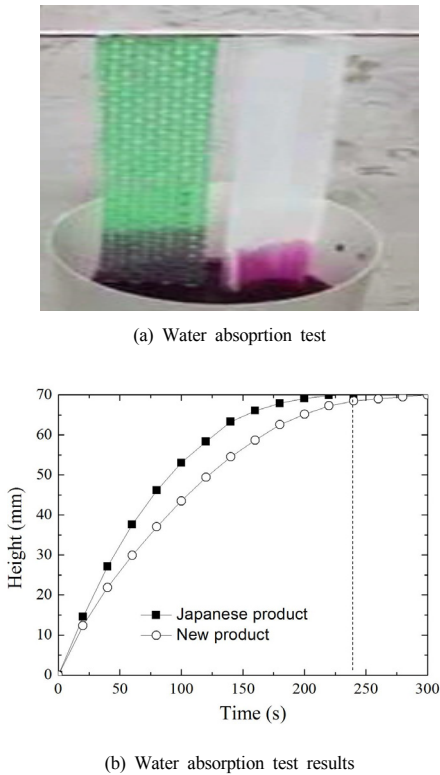


Fig. 8. Water absorption capability of the two samples

소자 형상이 가습 성능에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다. 일본 제품에서 공기는 절곡된 원단에 형성된 직경 2 mm, 피치 4 mm x 5 mm 구멍을 통과하면서 가습된다. 반면 개발품에서는 공기가 높이 2.2 mm, 피치 5.0 mm의 삼각 채널을 지나며 가습된다. 현저히 다른 두 형상에서 형상의 차이가 가습 성능에 미치는 영향을 파악하려면 확대 모형 실험, 수치해석 등을 통해 유동 패턴, 국소 물질전달계수의 분포 등을 검토할 필요가 있다. 이 부분에 대해서는 향후 연구를 수행할 예정이다.

Fig. 9에 j_m 과 f 인자를 나타내었다. j_m 인자의 경우 일본 제품에서 33%에서 41% 크게 나타났다. f 인자도 일본 제품에서 44%에서 70% 크다. j_m 인자가 일본 제품에서 크게 나타난 것은 물질전달계수 h_D 가 일본 제품에서 크기 때문이다. 식 (4)를 보면 j_m 인자는 h_D 와 비례함을 알 수 있다. f 인자가 일본 제품에서 크게 나타난 것은 식 (5)로부터 알 수 있듯이 압력 손실이 일본 제품에서 크기 때문이다.

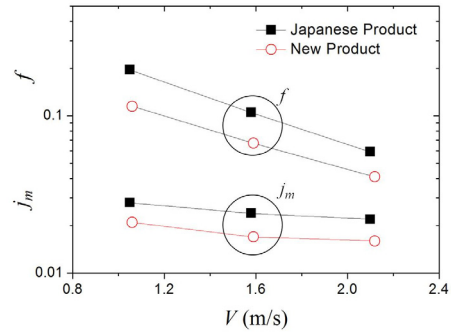


Fig. 9. j_m and f factors of the two samples

Fig. 10에 동일 압력손실에서 가습 성능을 의미하는 j_m/f 의 값을 나타내었다. j_m/f 값은 개발품에서 5%에서 28% 크을 보여준다. 이로부터 개발품이 일본 제품에 비하여 우수한 가습 성능 및 에너지 효율을 보인다고 판단할 수 있다.

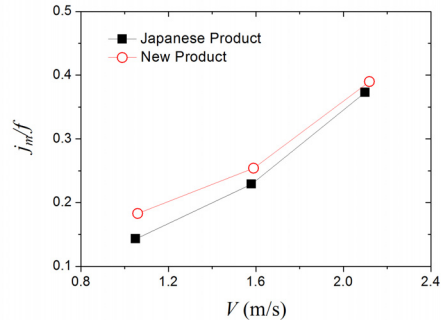


Fig. 10. j_m/f of the two samples

개발품의 경우 가습 및 마찰 손실이 삼각 채널 내에서 일어난다. 열 및 물질전달의 상사성에 따르면 무차원 물질전달계수인 Sherwood 수 [$Sh = h_D D_h / (\rho \nabla)$]는 무차원 열전달계수인 Nusselt 수와 동일하다 [15]. 상기 Sherwood 수에서 D_h 는 채널의 수력직경이고 ∇ 는 수분 확산계수로 상온에서 $2.57 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 값을 가진다. 또한 본 연구에서 수분 전달은 균일 온도 (포화 습구 온도)로 유지되는 가습 표면으로부터 발생하는데 이를 열전달로 상사하면 등온 조건이 된다. 본 개발품 삼각 채널의 꼭지각은 127° 이고 이 각도에서 등온 경계조건, 완전발달 층류유동 (본 연구의 Reynolds 수 범위는 183에서 364임)의 Nusselt 수는 1.90이고 fRe 는 12.6이다 [16]. Fig. 7의 h_D 로부터 Sherwood 수를 구해보면 3.2에서 5.1로 완전발달 값인 1.90보다 크다. 또한 Fig. 8로부터

터 구해지는 fRe 도 15.0에서 21.1로 완전발달 값인 12.6보다 크다. 이는 개발품의 채널 유동이 입구영역에 속해 있기 때문인데 입구 영역 (L_{ent})을 손쉽게 계산하는 식인 $L_{ent} = 0.05Re.ScD_h$ 에 대입해 보면 본 연구의 입구 영역 길이는 Reynolds 수 183에서 9.6 mm, 364에서 19.1 mm이다. 소자의 깊이가 26 mm 임을 고려하면 전체 길이의 37%에서 73%가 입구 영역에 속함을 알 수 있는데 이로 인하여 실험 Sherwood 수와 fRe 값이 완전 발달 값보다 크게 나타난다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 셀룰로오스와 PET 복합체로 만들어진 가정용 가습소자 개발품의 성능을 측정하고 합성 섬유 재질의 일본 제품 성능과 비교하였다.

- (1) 개발품의 가습 효율이 일본 제품에 비하여 2%~4% 우수하였다. 또한 개발품의 압력 손실이 일본 제품에 비하여 23%~32% 적게 나타났다.
- (2) 가습량과 압력손실을 j_m 과 f 인자로 나타내었을 때 일본 제품의 j_m 인자와 f 인자가 각각 33%~41%, 44%~70% 크게 나타났다.
- (3) 동일 압력손실에서 가습 성능을 의미하는 j_m/f 의 값은 개발품에서 5%에서 28% 크게 나타났다.
- (4) 개발품의 물 흡수도는 일본 제품에 비하여 작게 나타났는데 향후 이 부분에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

References

[1] I. H. Kim, K. Y. Kim and D. K. Kim, "Characteristics of bio-aerosol generation of household humidifiers by user practices", *Environ. Health*, Vol. 38, pp. 503-509, 2012.

[2] T. W. Kim, M. Kim, G. T. Kim, D. Y. Kim, B. Youn, D. K. Kim and Y. W. Han, "A theoretical study on the performance of humidification element," *Proc. Summer Annual Conf., SAREK*, pp. 163-166, 2015.

[3] M. Barsegar, M. Layeghi, G. Ebrahimi, Y. Hameh and M. Khorasani, "Experimental evaluation of the performance of cellulosic pas made of Kraft and NSCC corrugated papers as evaporative media", *Energy Convection and Management*, Vol.54, pp.24-29, 2012.

[4] J. K. Jain and D. A. Hindoliya, "Experimental performance of new evaporative cooling pad materials",

Sustainable Cities and Society, Vol 1. pp. 252-256, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2011.07.005>

[5] C. M. Liao, S. Singh and T. S. Wang, "Characterising the performance of alternative evaporative cooling media in thermal environmental control application", *J. Environ. Health*, Vol 33, No 7, pp.1391-1417, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10934529809376795>

[6] C. M. Liao and K. H. Chiu, "Wisd tunnel modeling the system performance of alternative cooling pads in Taiwan region", *Build. Environ.* Vol. 37, No. 2 pp. 77-87, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00098-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00098-6)

[7] B. R. Baliga and R. R. Azrak, Laminar fully developed flow and heat transfer in triangular plate-fin ducts, *J. Heat Transfer*, Vol. 108, pp. 24-32, 1986.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3246900>

[8] Zhang, L. Z., Heat and mass transfer in plate-fin sinusoidal passages with vapor permeable wall materials, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 618-629, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.050>

[9] Kim, N.-H., Performance Comparison between indirect evaporative cooler and regenerative evaporative cooler made of plastic/paper, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 17, No. 1, pp. 88-98, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.1.88>

[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] KARSE B 0050:2010, Indoor Humidifier.

[13] ASHRAE Standard 41.5, Standard measurement guide, engineering analysis of experimental data, ASHRAE, 1986.

[14] J. J. Lee, An Experimental Study on the Dehumidification Effectiveness for Operating Conditions of a Desiccant Rotor, Master's Thesis, Kookmin University, Republic of Korea.

[15] A. F. Mills, Basic Heat and Mass Transfer, Irwin Pub., 1995.

[16] R. K. Shah and A. L. London, Laminar Flow Forced Convection in Ducts, Academic Press, 1978.

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