

리튬브로마이드(LiBr) 수용액을 활용한 온실 제습을 위한 연구

어승희¹, 이정빈¹, 우종철¹, 강상묵¹, 김대현^{1,2*}

¹강원대학교 바이오시스템공학과, ²강원대학교 농업생명과학연구원

(2012년 5월 23일 접수, 2012년 6월 15일 수리)

The Study on Dehumidification for Greenhouse with Lithium-bromide(LiBr) Solution

Euh, S. H.¹, J. B. Lee¹, J. C. Woo¹, S. M. Kang¹ and D. H. Kim^{1,2*}

¹Department of Biosystems Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

²Agricultural and Life Sciences Research Institute, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

Abstract

Due to high temperature and humidity, usually greenhouses are not operated in summer season in Korea. Several methods are being applied to reduce temperature inside of the greenhouses, such as fog cooling and evaporative cooling pad, however those techniques cause increment of humidity as well leading lower crop productivity. In order to overcome this problem, preliminary experiment of dehumidification for the greenhouse was performed using Lithium-bromide(LiBr) solution as the dehumidifying materials. By passing through LiBr-moistened pad, the moisture in the ambient air is absorbed partially into the LiBr solution so that cooled air with suitable humidity for crops can be supplied into the greenhouses. For this test, two different pad types, 'Soundproof pad' and the 'Loofah pad', were used. At the test using the two different pad types, the deviation between inlet and outlet relative humidity (RH) was approximately 15% for both pad types. At the test in terms of wind speed change, RH deviation between inlet and outlet were 14.7% in case of 1.79 m/s and 16.1% in 0.89 m/s respectively. From these results, the air flow rate and the pad thickness were the dominant factors for absorbing water into the LiBr solution. The dehumidification system combined with evaporative cooling pad needs to be investigated for further study.

Key words: Air flow rate, Dehumidification, Fan and Pad, Lithium-bromide solution.

서론

온실은 자연재해로부터의 직접적인 작물 피해를 차단하고, 환경조건 등을 인공적으로 제어하여, 작물의 수확기를 조절할 수 있는 농업 시설로서, 널리 보급되어 활용되고 있다. 특히, 계절별 온도 변화의 폭이 크게 발생하는 국내의 기후 조건에서는 광도 온도 습도 등의 적절한 제어가 필수적이다.

여름철 고온기간(40°C 이상) 동안 온실을 비롯한 시설 재배 농가의 21.6%는 휴경을 선택하고, 무휴 농가의 대부분도 소극적인 냉방으로, 2.2%만이 Fan and Pad 시스템이 설치된 실정이다(Kim et al., 2001). 겨울철의 경우에도 온

실 보온 시설의 기밀성으로 인해 온실 내부에 다습한 환경이 조성되어, 작물의 증산 작용 억제 및 세균성 병해 등의 문제점이 발생되고 있다(Seginer et al., 1989). 이에, 온실 내 온도 및 습도 등의 적절한 환경 조건의 조성은 반드시 필요하다.

이와 관련하여, 온실의 냉방 및 제습과 관련된 문제점 개선 및 효율 향상을 위한 여러 가지 냉방 및 제습의 방식이 제안되었다. 냉방의 경우, '차광 및 자연환기', '기계적 냉방', '증발 냉각' 등의 방식과, 제습의 경우, '저온 표면 수분 응축(Yun et al., 1998)', '건조제(silica gel 등) 흡습식(Brusewitz et al., 1987)', '열교환기식(Yanadori et al., 1994)' 등의 방식이 개발되어 있으며, 특히, 냉방 방식 중

*Corresponding Author: Kim, D. H. (E-mail: daekim@kangwon.ac.kr)

에서는 증발 냉각 방식에 속하는 Fan and Pad법의 효율이 높은 것으로 알려져 있다(Arbel et al., 1999). 기존 건조 방식의 경우, ‘저온 표면 수분 응축’은 저효율로 히트펌프의 연계가 요구되고(Boulard et al., 1989), ‘열교환기 방식’은 대부분 냉매가스를 사용하고 있으며, ‘건조제(silica gel 등) 흡수식’은 공업용 제습으로 독성 재료 사용에 따른 유해한 온실 환경 조성 및 재료의 재생을 위한 과도한 에너지 소비가 발생되고, 시스템이 복잡한 문제점을 가지고 있다(Campen et al., 2003).

이에, 기존 제습 방식을 대체할 수 있는 새로운 제습 방식이 요구되며, 그 중에서도 상온에서 60~65%의 용해도를 나타내는 리튬브로마이드(LiBr) 수용액은 흡수식 냉난방 시스템에서 냉매인 물의 흡수작용을 담당하는 흡수제로서, 제습 시스템의 적용에 적합한 물질로 판단된다.

본 연구에서는 기존 냉각 방식 중 고효율의 Fan and Pad 방식에 리튬브로마이드 수용액을 적용한 Lab scale의 기초 실험 장치를 구성하여 공기유속, Pad 면적 및 두께, 리튬브로마이드 수용액의 양 등의 변수 및 조건에 의한 제습 능력을 분석하여, 온실 적용 가능성을 검증하고자 한다.

재료 및 방법

리튬브로마이드(LiBr) 수용액

Table 1. The physical and chemical Properties of Lithium-bromide (LiBr) solution

Chemical Formula	LiBr
Molecular weight	88.845
Components	Li 7.99%, Br 92.01%
Appearance	Colorlessness Crystal
Melting Point	547°C
Boiling Point	1265°C
Density	3.464g/cm ³ (Solid, 25°C) 2.370g/cm ³ (Liquid, 800°C)
Specific Heat	0.1428kcal/kg·K (Solid, 25°C)
Coefficient of Extension	266×10 ⁻⁶ K ⁻¹ (Liquid, 646°C)
Viscosity	2.28cP (Liquid, 600°C)
Dissolution Heat	33.39kcal/kg (Melting Point)
Vaporization Heat	407.9kcal/kg (Boiling Point)
Solubility for water	184kg/100kg (Solid, 25°C)
Permittivity	12.1 (Solid, 20°C)

본 실험에 사용된 리튬브로마이드 수용액은 식염과 유사한 안정적 물질로, 대기 중에서 변질, 휘발, 및 독성이 없는 인체에 무해한 특성을 나타내며, 리튬브로마이드 수

용액의 물리적·화학적 성질은 Table 1과 같다. 물에 대한 용해도는 상온(25°C)에서 약 63%, 40°C에서는 약 67%이며, 리튬브로마이드 수용액의 물에 대한 용해도 곡선은 Fig. 1과 같다.

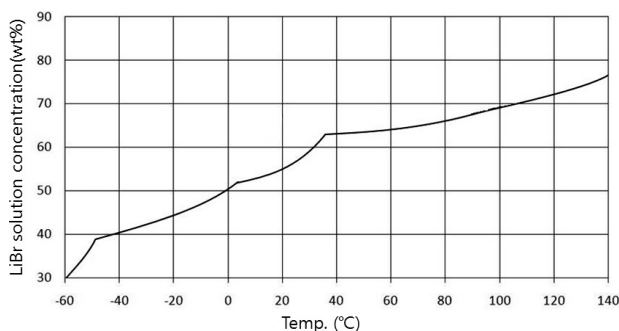


Fig. 1. LiBr solution solubility for water.

리튬브로마이드 수용액에 의한 물의 흡수

리튬브로마이드 수용액에 의한 수분의 흡수량(g)은 상대습도(%) 및 포화수증기량(g/m³)을 이용하여, 절대습도(g/m³)를 산출한 후 공기의 체적유량(m³/s)를 적용하여, 단위 시간당 리튬브로마이드 수용액에 의한 수분의 흡수량(g/s)을 산출할 수 있다. 절대습도(Absolute humidity, AH)는 상대습도(Relative humidity, RH) 및 포화수증기량(amount of Saturated Water Vapor, SWV)을 고려한 식[1]로 표현된다.

$$AH(g/m^3) = RH \times SWV(g/m^3) \quad [1]$$

단위 시간당 리튬브로마이드 수용액에 의한 수분의 흡수량(amount of Water absorption, WA)은 유입되는 공기의 절대습도(AH_i)와 리튬브로마이드 수용액을 통과한 공기의 절대습도(AH_o)의 차이와 공기의 체적유량(Volume Flow rate, VF)을 고려한 식 [2]로 표현된다.

$$WA(g/s) = (AH_i - AH_o)(g/m^3) \times VF(m^3/s) \quad [2]$$

실험 장치 구성 및 방법

리튬브로마이드 수용액을 적용한 Fan and Pad 방식의 제습 장치는 강원도 춘천시 강원대학교 농업생명과학대학 1호관 옥상(위도 37°5', 경도 127°4')에 고정 설치되었다. 시스템의 프레임은 4 mm 두께의 유리로 구성되었고, Fan, 파이프(duct), 습도계 등의 장치가 설치될 수 있도록 가공되었다. 제습 장치 내부의 습도 변화는 실험군 기상 관측장치(WatchDog 2800, Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, IL, USA)의 습도계와 더불어, 외부의 습도 변화

는 대조군 기상관측장치(Vantage KW, DAVIS Instruments, USA)의 습도계에 의해 측정 및 기록되었다. 약 60 mm 직경의 fan은 시스템 내부의 공기가 외부로 배출되도록 설치되었고, Pad를 포함하는 PVC 파이프(duct)는 fan의 반대 방향에 설치되어 외부의 공기가 내부로 유입되도록 설치되었다. 리튬브로마이드 수용액의 수분 흡수 여부를 검증하기 위한 실험 장치(Fig. 2(a)) 및 Pad 재질, 풍속, 리튬브로마이드 수용액의 양 등의 조건 변화가 용이한 Fan and Pad 시스템을 포함하는 실험 장치(Fig. 2(b))가 구성되었다.

본 실험에 적용된 변수는 리튬브로마이드 수용액의 양, Pad의 두께 및 종류(재질), 풍속 등으로, 리튬브로마이드 수용액은 PVC 파이프 100 mm(Pad 두께 70 mm) 당 12 mL씩 사용되었고, Pad의 종류는 방음재(일명 계란판 스폰지) 및 청수세미가 적용되었으며, 풍속은 1.79 m/s 및 0.89 m/s로 설정되었다. Pad의 종류 및 풍속에 대해서 pad 두께 변화를 각각 70 mm, 140 mm, 210 mm(LiBr 12 mL,

24 mL, 36 mL)로 변화시키며, 최소 24시간 이상 각 변수에 대해 실험이 진행되었다.

결과 및 고찰

실험은 실험군 대조군 습도계의 오차를 판별하기 위한 테스트를 시작으로 하여, 리튬브로마이드 수용액의 수분에 대한 흡수력을 검증하기 위한 기초실험이 진행되었다. 2012년 03월 01일 12시 00분부터 05일 11시 40분까지 수행된 습도계 오차 판별 테스트 결과 실험군 습도계에 의해 측정된 상대습도가 대조군 결과 대비 약 5.95% 낮게 나타났다. 리튬브로마이드 수용액의 흡수력 판별 테스트는 2012년 04월 05일 08시 25분부터 6일 08시 40분까지 진행되었으며, 상대습도의 변화를 살펴보면, 리튬브로마이드 수용액 50 mL가 적셔진 05일 08시 26분 이후에는 감소하기 시작하여, 동일 11시 48분에 10.7%까지 도달한 후 실험 종료 시 까지 평균 8.65%로 유지되었다(Fig. 3).

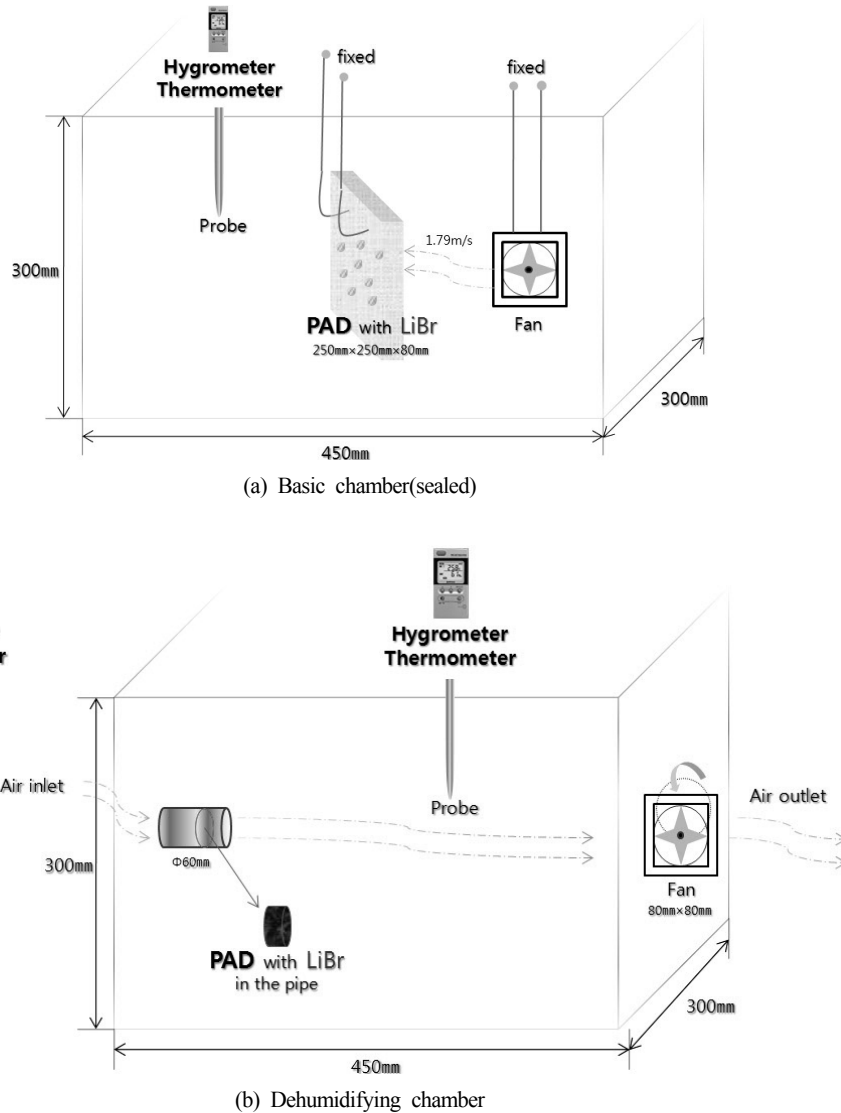


Fig. 2. Schematic of the dehumidifying system.

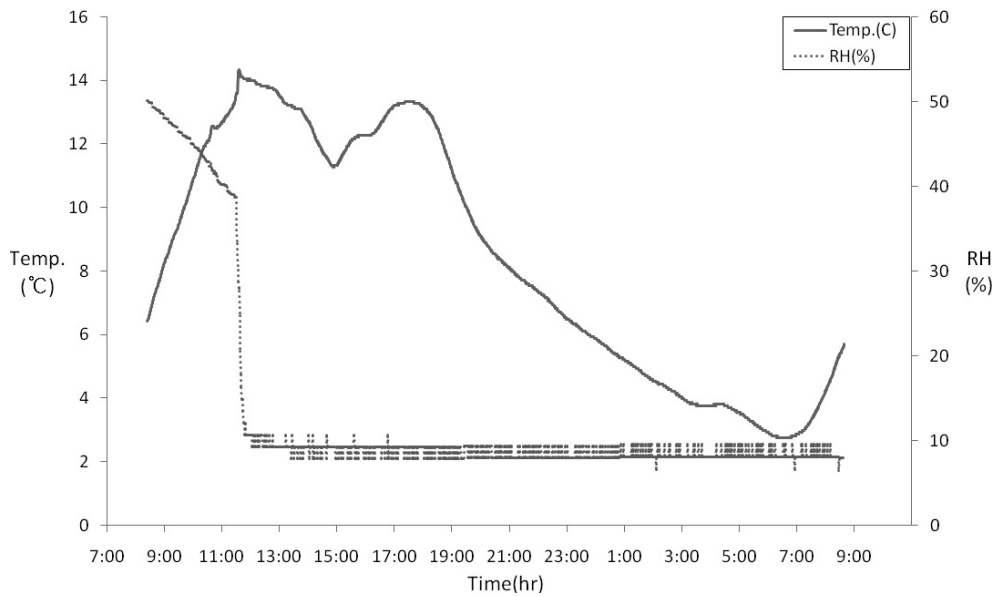


Fig. 3. RH variation by LiBr solubility effect on April 5 to 6, 2012.

Table 2. RH deviation in terms of the test variables

Test Variables			RH deviation (%) [Amount of water absorption (g/s)]
Wind speed (m/s) [Flow rate (m ³ /s)]	Pad types	Pad thickness (mm) [Amount of LiBr (mL)]	
1.79 [0.005]	Soundproof pad	70 [12]	11.05 [0.013]
		140 [24]	14.72 [0.017]
		210 [36]	15.10 [0.018]
	Loofah pad	70 [12]	14.60 [0.017]
		140 [24]	14.52 [0.017]
		210 [36]	15.13 [0.018]
0.89 [0.0025]	Loofah pad	70 [12]	17.46 [0.010]
		140 [24]	16.53 [0.009]
		210 [36]	14.24 [0.008]

변수에 따른 실험은 크게 두 가지로 분류 가능하며, (1) 풍속은 1.79 m/s로 고정되고, 방음재(soundproof pad) pad 및 청수세미(loofah pad) pad 두 종류에 대해, 각각 pad의 두께를 70 mm, 140 mm, 210 mm로 변화시킨 실험과, (2) Pad의 종류는 청수세미로 고정되고, 풍속 1.79 m/s 및 0.89 m/s 두 경우에 대해, 각각 pad의 두께를 70 mm, 140 mm, 210 mm로 변화시킨 실험이 수행되었으며, 결과는 Table 2와 같다.

Pad의 종류에 따른 실험은 풍속 1.79 m/s 하에서, pad의 두께가 70 mm, 140 mm, 210 mm (LiBr 12 mL, 24 mL, 36 mL)로 변화됨에 따라, 방음재 pad는 각각 11.05%p, 14.72%p, 15.10%p, 청수세미 pad는 각각 14.6%p, 14.52%p, 15.13%p로 각각 대조군의 상대습도 대비 편차를 나타내며 변화되었다(Fig. 4). 리튬브로마이드 수용액에 의한 단위시간당 수분 흡수량은 식[1, 2]에 의해 산출되었으며, 방음재 pad의 경우, 각각 0.013 g/s, 0.017 g/s, 0.018 g/s, 청

수세미 pad의 경우, 각각 0.017 g/s, 0.017 g/s, 0.018 g/s로 산출되었다. 이를 통해, pad 두께 70 mm에서의 상대습도 편차는 방음재 pad가 청수세미 pad 대비 3.55%p 작은 값을 나타내었으나, pad 두께가 상승하면서 0.20%p 이하의 차이로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

Fan의 풍속(1.79 m/s 및 0.89 m/s)에 따른 실험은 청수세미 pad 하에서, pad의 두께가 70 mm, 140 mm, 210 mm (LiBr 12 mL, 24 mL, 36 mL)로 변화됨에 따라, 풍속 1.79 m/s에서는 각각 14.6%p, 14.52%p, 15.13%p, 풍속 0.89 m/s에서는 각각 17.46%p, 16.53%p, 14.24%p로 각각 대조군의 상대습도 대비 편차를 나타내며 변화되었다(Fig. 5). 리튬브로마이드 수용액에 의한 단위시간당 수분 흡수량은 풍속이 1.79 m/s인 경우, 각각 0.017 g/s, 0.017 g/s, 0.018 g/s, 풍속이 0.89 m/s인 경우, 각각 0.010 g/s, 0.010 g/s, 0.008 g/s로 산출되었다. 이를 통해, 풍속 1.79 m/s에서의 상대습도 편차는 pad 두께 증가에 따라 0.08%p 감소 후 0.61%p

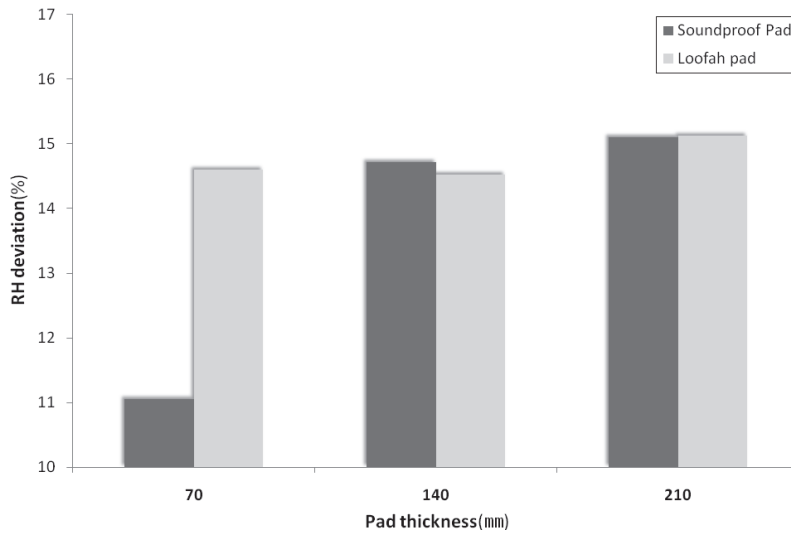


Fig. 4. RH deviation in terms of the different pad type.

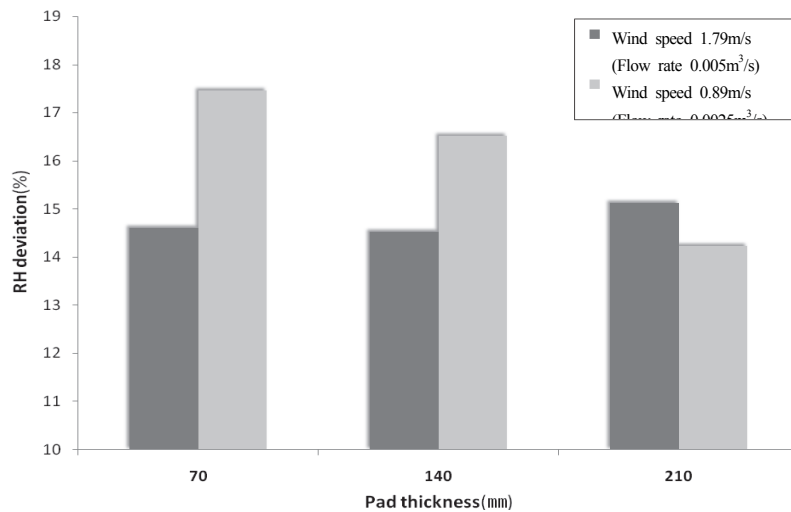


Fig. 5. RH deviation in terms of the different wind speed.

상승하는 경향을 나타낸 반면, 풍속 0.89 m/s에서는 pad 두께 증가에 따라 0.93%p 감소 후 2.29%p 감소하는 것을 확인할 수 있다.

요 약

본 연구에서는 리튬브로마이드 수용액을 적용한 Fan and Pad Design의 온실 제습을 위한 기초 연구가 수행되었다. 리튬브로마이드 수용액의 흡수력 판별 테스트에서는 제습 시스템 내부 습도가 50%에서 10%이하로 감소되는데 3시간 37분이 소요되었으며, 식 [1, 2]에 의한 리튬브로마이드 수용액에 의한 수분의 흡수량은 0.373 g/s로 산출되었다. 이를 통해, 리튬브로마이드 수용액을 통한 온실 제습의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

Pad의 종류에 따른 실험에서, pad 두께가 70 mm, 140

mm, 210 mm로 변화되었을 때, 방음재 pad 및 청수세미 pad에 의한 리튬브로마이드 수용액의 흡수력은 각각 3.55%p, 0.20%p, 0.03%p 차이를 나타내었으며, pad의 두께가 증가됨에 따라 외부의 상대습도 대비 제습 시스템 내부의 상대습도 편차가 상승하는 경향을 나타내었다. 이를 통해, pad 두께 70 mm일 때, 청수세미 pad가 상대습도를 감소시키는데 유리한 재질로 판단된다.

풍속의 변화에 따른 실험에서 pad 두께가 70 mm, 140 mm, 210 mm로 변화되었을 때, 1.79 m/s 및 0.89 m/s일 때의 리튬브로마이드 수용액의 흡수력은 각각 2.86%p, 2.01%p, 0.89%p 차이를 나타내었으며, 풍속이 1.79 m/s의 경우에는 pad의 두께가 70 mm에서 210 mm로 증가되었을 때, 외부의 상대습도 대비 제습 시스템 내부의 상대습도 편차가 0.53%p 상승하였으나, 풍속 0.89 m/s 경우에는 pad의 두께가 70 mm에서 210 mm로 증가되었을 때,

3.22%p 감소되었다. 이를 통해, pad 두께 140 mm 이하에서는 풍속이 0.89m/s가 적합하고, pad 두께 210 mm에서는 풍속 0.89 m/s가 적합한 것으로 나타났다. 또한, 풍속 1.79 m/s 하에서는 210 mm 두께의 pad가, 풍속 0.89 m/s 하에서는 70 mm 두께의 pad가 상대습도 감소에 가장 유리한 조건으로 판단된다.

향후, 풍속(공기 유량)에 대한 리튬브로마이드 수용액의 물에 대한 흡수량의 관계성에 대한 추가적 분석이 요구되고, 식[1, 2]를 통해 산출된 수분의 흡수량 역시 실험을 통한 비교 분석이 필요하다. 또한, Lab scale의 제습시스템에서 Farm scale의 온실 규모로 확장하여, 추가 변수에 대한 제습 실험과 더불어, 냉방 시스템과의 연계성 분석 연구 역시 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- Albel, A., Yekutieli, O., M. Brank. (1999) Performance of a fog system for cooling greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72:129-136.
- Boulard, T., Baille, A., Jagier, J. (1989) Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump. *Journal of Agricultural Engineering Research* 44:191-204.
- Brusewitz, G. H., Stone, M. L. (1987) Microcomputer controlled desiccant dehumidifier. *Transactions of the ASAE* 30(2):459-463.
- Campen, J. B., Bot, G. P. A., Zwart, H. F. (2003) Dehumidification of greenhouses at northern latitudes. *Biosystems Engineering* 86(4):487-493.
- Kim, M. K., Kim, K. S., Nam, S. W. (2011) Efficient application of greenhouse cooling systems. *Ministry of Agriculture and Forestry* 186-188.
- Seginer, I., Kantz, D. (1989) Night time of dehumidifiers in greenhouses: an analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research* 44:141-158.
- Yanadori, M., Hamano, M. (1994) Dehumidification in the greenhouse by the ventilation type dehumidifier with heat-flow controllable heat exchanger. *Solar Energy* 53(1):117-123.
- Yun, N. K., Kim, M. K., Nam, S. W. (1998) Dehumidification and evaporative cooling efficiency by water pipes in greenhouse. *J. Bio. Fac. Env.* 7(3):237-245.