

리튬브로마이드(LiBr) 용액의 흡습성질과 냉각코일을 이용한 온실 습도 및 온도 제어

이상열¹ · 이충건¹ · 어승희¹ · 오광철¹ · 오재현² · 김대현^{1*}

¹강원대학교 바이오시스템공학과, ²국립산림과학원 산림생산기술연구소

Dehumidification and Temperature Control for Green Houses using Lithium Bromide Solution and Cooling Coil

Sang Yeol Lee¹, Chung Geon Lee¹, Seung Hee Euh¹, Kwang Cheol Oh¹,
Jae Heun Oh², and Dea Hyun Kim^{1*}

¹Dept. of Biosystem Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

²Forest Practice Research Center, Korea Forest Research Institute, Pocheon 487-498, Republic of Korea

Abstract. Due to the nature of the ambient air temperature in summer in Korea, the growth of crops in greenhouse normally requires cooling and dehumidification. Even though various cooling and dehumidification methods have been presented, there are many obstacles to figure out in practical application such as excessive energy use, cost, and performance. To overcome this problem, the lab scale experiments using lithium bromide(LiBr) solution and cooling coil for dehumidification and cooling in greenhouses were performed. In this study, preliminary experiment of dehumidification and cooling for the greenhouse was done using LiBr solution as the dehumidifying materials, and cooling coil separately and then combined system was tested as well. Hot and humid air was dehumidified from 85% to 70% by passing through a pad soaked with LiBr, and cooled from 308K to 299K through the cooling coil. computational Fluid Dynamics(CFD) analysis and analytical solution were done for the change of air temperature by heat transfer. Simulation results showed that the final air temperature was calculated 299.7K and 299.9K respectively with the deviation of 0.7K comparing the experimental value having good agreement. From this result, LiBr solution with cooling coil system could be applicable in the greenhouse.

Additional key words : Dehumidification, Fan and Pad, Lithium-bromide solution.

서 론

국내의 기후 특성상 여름철의 온실 내부 기온의 과다 상승과 습한 날씨로 인해 작물의 정상적인 생육을 위해서는 냉방과 제습이 필수적이다. 하지만 많은 농가에서는 경제적인 부담으로 인해, 여름철 고온기간(313K 이상) 동안 전체 21.6%의 시설재배 농가가 휴경하고 있고, 2.2%만이 Fan and Pad 시스템이 설치된 실정이다(Kim et al., 2001). 또한 겨울철에는 온실 보온 시설의 기밀성으로 인해 온실 내부에 다습한 환경이 조성되어, 작물의 증산 작용 억제 및 세균성 병해 등의 문제점이 발생되고 있다. 따라서, 온실 내 온도 및 습도 등의 적절한 환경 조건의 조성은 반드시 필요하다(Euh et al., 2012).

이와 관련하여, 여러 가지 냉각, 제습 시스템이 제안되고 있다. 그 중 냉방의 경우, '포그 냉방(Yu et al., 2002)', '증발 냉각(Nam, 1998)' 등의 방식과 제습의 경우, '열교환기식(Jeon et al., 2011)', '저온 표면 수분 응축(Yun et al., 1998)' 등의 방식이 개발되어 있으며, 그 중 증발 냉각 방식인 Fan and Pad 방법의 효율이 높은 것으로 알려져 있다. 하지만 온실 내부 습도의 과다 상승에 따른 문제점이 발생되어 냉각과 동시에 제습이 반드시 필요하다.

본 연구에서는, 냉각 및 제습을 동시에 실시하기 위해 Fan and Pad 방식에 리튬브로마이드 용액과 냉각 코일을 적용하여 냉각 및 제습 시스템을 구축하였고, 고온·다습한 공기가 유입되는 과정에서 제습 및 냉각이 순차적으로 발생할 수 있도록 설계되었다. 냉매로는 물을, 제습제는 상온에서 60~65%의 용해도를 나타내는 리튬브로마이드(LiBr) 수용액이 적용되었다. 또한, Lab scale

*Corresponding author: daekim@kangwon.ac.kr

Received October 6, 2014; Revised November 18, 2014;

*Accepted November 25, 2014

의 유리 Chamber 내부로 유입되는 공기의 풍속 $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 냉각수 온도 변화에 따른 냉각 실험, 리튬브로마이드 수용액을 활용한 제습 실험, 그리고 냉각과 제습을 동시에 적용한 냉각·제습 실험이 각각 수행되었다.

재료 및 방법

1. 리튬브로마이드(LiBr) 수용액

본 실험에 사용된 리튬브로마이드 수용액은 식염과 유사한 안정적 물질로, 대기 중에서 변질, 휘발 및 독성이 없는 인체에 무해한 특성을 나타내며, 상온에서 약 60%로 용해도가 높고, 밀도는 고체에서 $3.464\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 액체에서 $2.370\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 이다. 또한 비열은 $0.1428\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 로 작아 흡수열이 우수한 특성을 가지며, 물리적·화학적 성질은 Table 1과 같다.

2. 리튬브로마이드 수용액에 의한 물의 흡수

리튬브로마이드 수용액에 의한 수분의 흡수량(g)은 상대습도(Relative humidity, RH, %) 및 포화수증기량($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)을 이용하여, 절대습도(Absolute humidity, AH, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)를 산출한 후 공기의 체적유량($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)를 적용하여, 단위 시간당 리튬브로마이드 수용액에 의한 수분의 흡수량($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)을 산출할 수 있다. 절대습도는 상대습도 및 포화수증기량(Amount of saturated water vapor, SWV)을 고려한 식 [1]로 표현된다(Euh et al., 2012).

$$AH(\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) = RH \times SWV(\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) \quad (1)$$

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	820K
Boiling point	1538K
Density	3.464(Solid, 298K) 2.370(Liquid, 1073K)
Specific heat	0.1428kcal/kg K
Coefficient of Extension	(Liquid, 919K)
Viscosity	2.28cP(Liquid, 873K)
Dissolution heat	33.39(Melting Point)
Vaporization heat	407.9(Boiling Point)
Solubility for water	184kg/100kg(Solid, 298K)
Permittivity	12.1(Solid, 293K)

단위 시간당 리튬브로마이드 수용액에 의한 수분의 흡수량(Amount of water absorption, WA, $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$)은 유입되는 공기의 절대습도(AH_i)와 리튬브로마이드 수용액을 통과한 공기의 절대습도(AH_o)의 차이와 공기의 체적유량(Volume flow rate, VF, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)을 고려한 식 [2]로 표현된다(Euh et al., 2012).

$$WA(\text{g}\cdot\text{s}^{-1}) = (AH_i \times AO_o)(\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) \times VF(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}) \quad (2)$$

3. 물에 의한 공기의 냉각

물에 의한 공기의 냉각 정도는 공기가 코일과 닿는 면적(A, m²) 및 코일의 열전달계수(h, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$), 공기와 Cooling coil 표면의 온도차(K)를 이용하여 열량(Q, W)을 산출한 후 공기의 질량유량($\dot{m}, \text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)과 비열($C_p, \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), 유입되는 공기의 온도(T_i)를 적용하면 냉각 공기 온도(T_o)를 산출할 수 있다. 열량을 구하는 공식은 코일과 공기가 닿는 면적과 코일의 열전달계수, 공기와 coil 표면의 온도차($\Delta T, \text{K}$)를 고려한 식 [3]으로 표현된다.

$$Q(W) = A(\text{m}^2) \times h(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}) \times \Delta T(\text{K}) \quad (3)$$

유입된 공기가 냉각 부분을 지나 냉각된 공기온도는 공기의 질량유량과 비열, 유입되는 공기의 온도를 고려한 식 [4]로 표현된다.

$$T_o(\text{K}) = \frac{\dot{m}(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}) \times C_p(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})T_i(\text{K}) - Q(W)}{\dot{m}(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}) \times C_p(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})} \quad (4)$$

4. 실험 장치 구성

리튬브로마이드 수용액과 냉각코일을 적용한 Fan and Pad 방식의 온실 냉각 및 제습 장치의 실험을 위해 4mm 두께의 유리를 사용하여 규격의 Chamber를 제작하였고, 여름철 고온·다습한 환경을 만들기 위해 적외선 히터기를 사용하여 실험 환경을 조성하였다. 2800RPM의 Fan은 시스템 내부의 공기가 외부로 배출되도록 설치되었고, pad와 냉각코일을 포함하는 PVC 파이프는 Fan 반대 방향에 설치되어 외부의 공기가 내부로 유입되도록 설치되었다(Fig. 1). 위치별 온도와 습도 변화를 알아보기 위하여 시스템 외부, pad와 냉각코일 사이, 시스템 내부에 각각 열전대(K-type)와 온습도기록계(DT-171, CEM, China)를 설치하여 위치별 온습도 변화를 관측하였으며, 데이터로거(GL800, Graphtech, Japan)를 이용하여 데이터를 수집하였다. pad는 다공성 물질 중 하나인 청수 세미를 사용하였고, 냉각코일은 관 내부 직경 8mm, 바깥 지름 55mm, 6T인 냉각 코일(stainless steel, (주) 에스앤아이, 대한민국)을 사용하였으며, 코일 안쪽에 냉각핀을 설치한 뒤 열손실을 막기 위해 파이프 외부를 단열하여

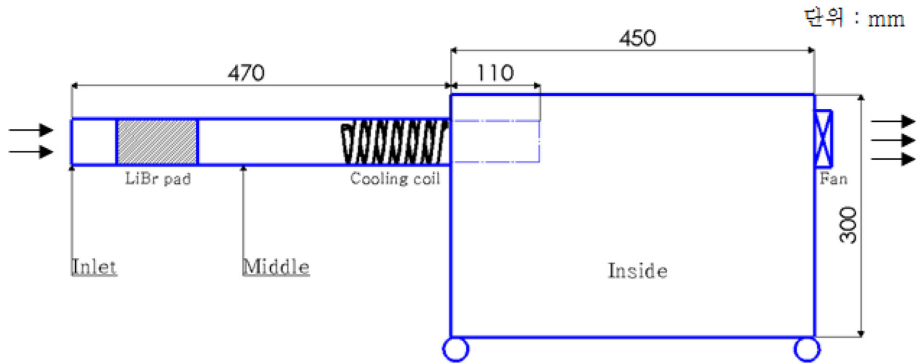


Fig. 1. Fan with pad and cooling coil system schematic.



Fig. 2. Pipe with the pad and the cooling coil.

실험을 진행하였다(Fig. 2).

본 실험은 냉각수 온도를 변수로 적용하여 냉각수 온도별 증발냉각 효과를 확인한 뒤, 제습 실험을 각각 수행하였으며, 그 후 냉각 및 제습을 동시에 적용하여 실험을 진행하였고, 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용한 시뮬레이션을 통해 실제 성능실험 결과 대비 비교, 분석되었다.

결과 및 고찰

시스템에서 제습 pad를 적용하지 않고 냉각코일만을 이용한 증발냉각 실험을 수행한 결과, 냉각코일을 흐르는 물의 온도에 따라 공기의 온도가 다르게 변화하였다. 약 311K의 외부공기에 대해 각각 279K의 수온에서는 약 19K, 286K의 수온에서는 13K, 293K의 수온에서는 10K 가량 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 이는 냉각수에 의해 코일 표면의 온도가 낮아질수록 공기와의 온도차(ΔT)가 상승하여 냉각량이 증가하는 것으로 분석된다.

외부습도 약 80~90%의 실험조건에서, 냉각코일을 제거한 상태에서 LiBr 수용액의 제습능력을 확인하기 위해 실험을 수행한 결과, Fig. 4와 같이 시스템 외부와 내부의 습도차가 약 30% 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 리튬브로마이드 수용액이 공기중의 수분을 흡수하여 제습된 것으로 분석된다.

냉각코일과 제습 pad 동시에 적용한 실험은, 외부기온 약 308K, 습도 약 85%의 실험조건 하에서, Fig. 5와 같

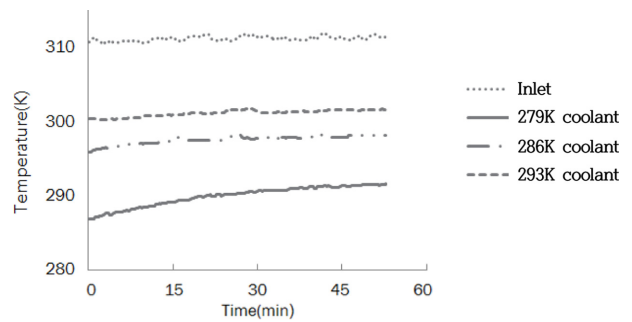


Fig. 3. The inside air temperature change according to the different water temperature of the coil.

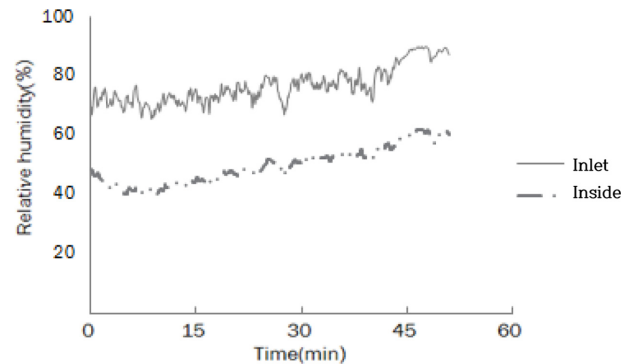


Fig. 4. Relative humidity change by dehumidification system using LiBr solution.

이 외부공기가 제습 pad를 통과하는 순간 리튬브로마이드 수용액이 수분을 흡수할 때 발생하는 흡수열(Park, 1994)로 인해 중간 온도가 약 311K로 증가 되는 경향을 나타내었으나, 냉각코일을 통과하면서 약 299K로 냉각 되는 것으로 나타났다. 습도는 Fig. 6과 같이 약 85%의 외부 습도가 제습 pad를 지나면서 약 50%로 감소하는 경향을 나타내었으나, 냉각코일을 통과하는 순간 약 70%로 상승하는 결과로 나타났다. 이는 냉각 코일 표면에 응축된 수분과 공기가 접촉하면서 습도가 상승하는 것으로 판단된다. 결과적으로 외부공기가 냉각코일과 제습

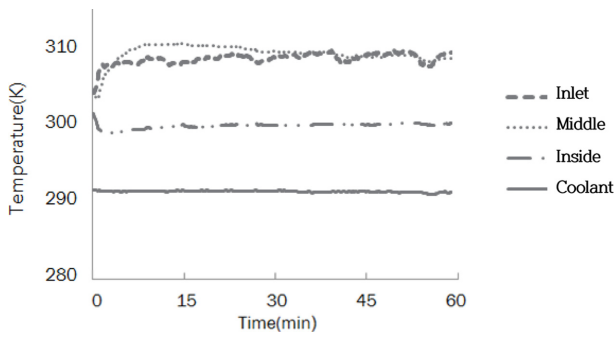


Fig. 5. Air temperature change by cooling system.

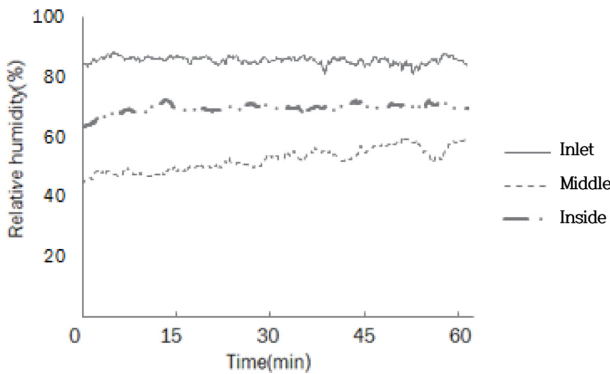


Fig. 6. Relative humidity change by dehumidification system.

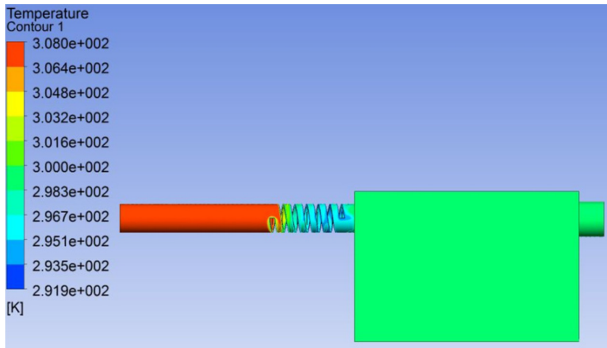


Fig. 7. Air temperature distribution in the chamber (Using CFD).

pad를 포함하는 파이프를 통과하여 시스템 내부로 유입되는 과정에서 약 9K의 냉각과 15%의 제습량을 나타내었다.

냉각코일을 적용한 냉각시스템의 열유동 해석은 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용하여 3D로 모델링 하였고, 유입 공기 온도 308K, 유출 공기 온도 299K, 냉각코일 표면 온도 291K로 설정하여 실제 성능시험과 동일한 조건하에서 분석이 실시되었으며, 분석 결과 내부 온도 299.7K로 수렴하여 실제 성능 시험과 일치되는 것으로 나타났다(Fig. 7).

또한, 식 [4]를 이용하여 유입된 공기가 냉각 코일을

Table 2. Comparison the predicted results with the experimental data (Unit : K)

The inlet air temperature		308		
Air temperature in the chamber	Calculation	Simulation	Experiment	
	299.9	299.7	299.0	

지나 내부로 유입되는 과정에서 냉각된 공기의 값을 계산하였으며, 299.9K로 계산되었다.

제습을 제외한 냉각 시스템에서의 시뮬레이션 값과 실험결과, 이론 계산 결과 값은 Table 2에서 보는바와 같이 실험결과를 기준으로 계산 값과 시뮬레이션 결과가 각각 0.9K, 0.7K로 상당히 유사한 값을 도출했으며, 이를 바탕으로 Simulation이 잘 정립되었다고 판단된다.

적 요

본 연구는 냉각코일과 리튬브로마이드 수용액을 활용하여 유리 chamber 내 냉각 및 제습 실험을 수행하였다. 냉각수 온도별 냉각 효과와 리튬브로마이드 수용액의 제습량을 확인하였으며, 이를 동시에 적용하여 실험을 수행하였다. 냉각수 온도별 냉각 실험은 279K, 286K, 293K에서 각각 19K, 13K, 10K 가량 감소되는 경향을 보였다. 냉각수 온도가 낮을수록 높은 냉각 성능을 보였으며, 여름철 상하수도 온도인 293K의 물로도 충분히 작물이 생육하기 좋은 온실 내부온도를 유지할 수 있다고 판단되었다. 또한 리튬브로마이드 수용액을 활용한 제습 실험에서는 약 80%의 외부 습도가 리튬브로마이드 수용액과 결합하여 약 50%로 감소되어 약 30%의 제습량을 보였으며, 이는 시설 내 제습 시스템의 적용에 적합한 물질로 판단된다.

냉각코일과 리튬브로마이드 수용액을 동시에 적용한 실험에서 약 9K의 온도 강하, 15%의 제습량을 나타냈으며, 리튬브로마이드 수용액이 수증기를 흡수하는 과정에서 반응열이 발생하는 것을 확인하였다.

또한, 시뮬레이션을 통해 냉각 실험 결과와 대비 비교한 결과 약 299.7K의 내부 온도를 보여 일치하는 것을 확인하였다.

수분의 제습과정을 거치면서 농도가 낮아진 리튬브로마이드 수용액(희용액)은 수집탱크로 모아 재생부로 이송되어 가열, 수분을 증발시켜 농용액으로 전환된 후 열교환을 거쳐 냉각되어 다시 제습시스템으로 공급되는 시스템을 적용하면 일정량의 리튬브로마이드 수용액만으로 온실 제습을 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 실험을 통해 냉각 및 제습이 동시에 가능하다는 것을 확인하였으며, 리튬브로마이드 수용액을 활용하여 실제 온실에 적용된다면 기존 온실에서 사용하고 있는 냉

방 및 제습 방법에 비해 에너지 절감을 통한 경제적 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

향후, 제습 부분은 시뮬레이션을 통한 분석 및 실험결과와 대비 검증이 요구되고, Lab scale의 제습 시스템에서 Farm scale의 온실 규모로 확장하여, 추가 변수에 대한 제습 및 냉각 연구가 수행되어야 할 것이다.

Literature Cited

- Euh, S.H., J.B. Lee, J.C. Woo, S.M. Kang, D.M. Kim. 2012. The Study on Dehumidification for Greenhouse with Lithium-bromide(LiBr)Solution. *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences*, 24(2):24-29. (in Korea)
- Park, S.H. 1994. Experimental Study on the Absorption Characteristics of LiBr-Water solution in a Vertical Tube. M.S. Diss., Hongik Univ. (in Korea)
- Park, B.C., H.K. Park, J.H. Boo, J.S. Seo, T.B. Seo, K.J. Lee, J.S. Lee, and T.Y. Jeong. 2008. Introduction to Heat Transfer. 5th ed. Text Books.
- Kim, M.K., K.S. Kim, and S.W. Nam. 2001. Efficient application of greenhouse cooling systems. Ministry of Agriculture and Forestry 186-188.
- Yun, N.K., M.K. Kim, and S.W. Nam. 1998. Dehumidification and evaporative cooling efficiency by water pipes in greenhouse. *J. Bio. Fac. Env.* 7(3):237-245.
- Yu, I.H., M.K. Kim, H.J. Kwon, and S.S. Kim. 2002. Development of CFD model for estimation of cooling effect of fog cooling system in greenhouse. *Journal of Bio-Environment Control*, 11(2):93-100. (in Korea)
- Nam, S.W. 1998. Adaptability of evaporative cooling system for greenhouse to the weather conditions of Korea. *Journal of Bio-Environment Control*, 7(4):283-289. (in Korea)
- Jeon, D.S., J.H. Moon, S.C. Kim, Y.L. Kim. 2011. Dehumidification performance of a plate heat exchanger type dehumidifier for a liquid desiccant system. 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers Journal, pp 177-180. (in Korea)