

이성분 나노유체(H₂O/LiBr+나노입자)를 적용한 유하박막 흡수기의 열 및 물질전달 촉진 실험

김현대 · 김성수* · 남상철**, 정진희** · 강용태****†

경희대학교 기계공학과, *우성산업기술연구소, **LS전선(주), ***경희대학교 기계산업시스템공학부

An Experimental Study on Falling Film Heat and Mass Transfer for Binary Nanofluids (H₂O/LiBr+Nanoparticles)

Hyundae Kim, Sung Su Kim*, Sang Chul Nam**, Jin Hee Jeong** and Yong Tae Kang****†

Graduate School, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

*Woo Sung Institute of Industrial Technology, Suwon 440-180, Korea

**LS Cable Ltd, Anyang 431-080, Korea

***School of Mechanical and Industrial Systems Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Korea

ABSTRACT: The objectives of this study are to investigate the combined heat and mass transfer enhancement using binary nanofluids as the working fluids in a H₂O/LiBr absorber. The result of heat and mass transfer experiment with the additives(Arabicgum, 2E1H) showed that the heat and mass transfer performance of binary nanofluid with 2E1H enhanced significantly in comparison with that without additive. In the case of 0.01wt% Al₂O₃ binary nanofluids with 2E1H, the vapor absorption rate increased up to 77% in comparison with that without additive. The heat transfer rate of 0.01wt% Al₂O₃ binary nanofluids with 2E1H increased up to 19%. Based on the experimental results, it is recommended that the Al₂O₃ binary nanofluid be good with 2E1H to improve the heat and mass transfer performance.

Key words: Binary nanofluids(이성분나노유체), H₂O/LiBr solution(리튬브로마이드 수용액), Al₂O₃ nanoparticles(알루미나 나노입자), surfactant(계면활성제), Absorption rate(흡수율), 2-Ethyl-1-Haxanol(2에틸1헥산올)

기 호 설 명

- C_p : 비열 [kJ/kg·K]
- h : 열전달계수 [kW/m²·K]
- H : 엔탈피 [kJ/kg]
- \dot{m} : 질량유량 [kg/s]

T : 온도 [°C]

그리스 문자

x : 리튬브로마이드수용액 농도 [wt%]

1. 서 론

흡수식 시스템은 기본적으로 자연냉매를 사용하여 환경적인 독성이 없으며 천연가스 또는 폐

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-202-3260

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

열을 이용하기 때문에 에너지 수급의 불균형을 해소할 수 있는 장점이 있다. 또한, 구동원으로 LNG, LPG, 경유 등을 사용하므로 고가의 전력에너지를 사용하는 증기 압축식 냉동기에 비해 상대적으로 운전비용이 저렴하다. 현재 주로 사용되고 있는 흡수식 시스템의 냉매/흡수제로는 물/리튬브로마이드($H_2O/LiBr$)와 암모니아/물(NH_3/H_2O)이 있다.⁽¹⁾ 대형 공조 시스템에 주로 쓰이는 물/리튬브로마이드시스템⁽²⁾은 물의 우수한 열역학적 특성과 무독성, 장치의 안정성 등의 장점을 지니고 있으나 증발온도를 $0^{\circ}C$ 이하로 내리는 것이 불가능하고, 리튬브로마이드 수용액의 결정화 문제로 인해 공랭화가 불가능한 것이 단점이다. 이에 비해 암모니아/물 흡수식시스템⁽³⁾은 냉매인 암모니아의 자체 독성과 작동압력이 고압이라는 단점을 가지고 있으나, 결정화 문제가 없어 공랭화가 가능하여 소형으로 제작이 가능하고, 최대 $-70^{\circ}C$ 까지 증발온도를 얻을 수 있어 저온획득이 쉬운 장점 등으로 관심을 모으고 있다. 이에 따라 전 세계적으로 흡수식 시스템의 소형화 및 성능향상을 위한 연구들이 활발하게 수행되고 있다.

현재 흡수식 시스템의 연구는 시스템의 성능향상을 위한 연구를 중심으로, 열교환기 효율향상과 내부 열회수를 목적으로 하여 연구되어 왔다.⁽¹⁾ 특히, 흡수기는 열 및 물질전달이 동시에 발생하는 장치로써 흡수기의 흡수성능은 시스템의 성능향상에 매우 중요한 역할을 한다. 흡수기에서 냉매가 작동유체에 흡수될 때 흡수열이 발

생하게 되며 이에 따른 온도상승으로 인해 흡수율이 감소하게 된다. 이 성분 나노유체를 작동유체로 사용했을 경우 흡수열을 빨리 제거할 수 있으며 흡수성능 또한 향상시킬 수 있다는 것이 확인되었다.⁽⁴⁾ 이와 관련하여 최근에는 나노유체를 이용하여 시스템의 성능을 향상시키려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 나노유체가 가지는 장점들을 흡수식 시스템에 적용하기 위한 연구로써 리튬브로마이드 수용액을 모유체로 한 Al_2O_3 이 성분 나노유체의 분산안정제 및 계면활성제 첨가에 따른 열 및 물질전달 향상 정도를 측정하고 그 특성을 파악하는 것을 목표로 진행되었다.

2. 실험장치 및 방법

열전달 실험장치는 Fig. 1에서와 같이 흡수기와 보조탱크, 냉동기로 구성되어 있다. 흡수기 내부에는 직경 15 mm, 관길이 500 mm의 전열관을 8 줄로 배열하여 내부로는 냉각수가 흐르게 하였다. 그리고 흡수기 전면부에 강화유리로 가시화창(가로 300 mm, 세로 200 mm, 두께 10 mm)을 설치하여 액막유동을 육안관찰 할 수 있도록 하였고 가시화창을 제외한 나머지 실험 단면부는 외부로의 열손실을 막기 위해 단열을 하였다. 실험을 수행하기 전 흡수기를 실제 흡수식시스템의 조건과 동일하게 하기 위해 진공펌프를 이용하여 흡수기 내부의 압력을 0.01 bar의 진공상태로 만들어 주었고 이를 진공압력계를 통하여 확인하였다. 흡수기를 비롯한 모든 장치들은 부식성이 강한 용액과 외압에 견딜 수 있도록 하기 위해 스테인리스강 및 구리 재질 등으로 제작하였다.

흡수기 하부에 설치된 두 개의 4 kW급 관입형 히터는 내부의 용액을 가열시켜 수증기를 발생시킨다. 수증기가 발생됨과 동시에 하부의 용액은 화학용 마그네틱 펌프에 의해 보조탱크 안으로 이송된다. 보조탱크로 이송된 용액은 내부의 히터와 냉각수에 의해 흡수기 입구온도와 같은 조건으로 맞추어 지게 된다. 보조탱크안의 용액은 다시 같은 용량의 마그네틱 펌프에 의해 이송되어 흡수기 내부의 상단에 위치한 분배기로 공급되고 흡수기 내부의 전열관에 유하박막을 형성하게 된다. 분배기로 공급되는 유량은 $\pm 0.1\%$ 의 오차를 가진 전자유량계에 의해 측정된다. 분배기

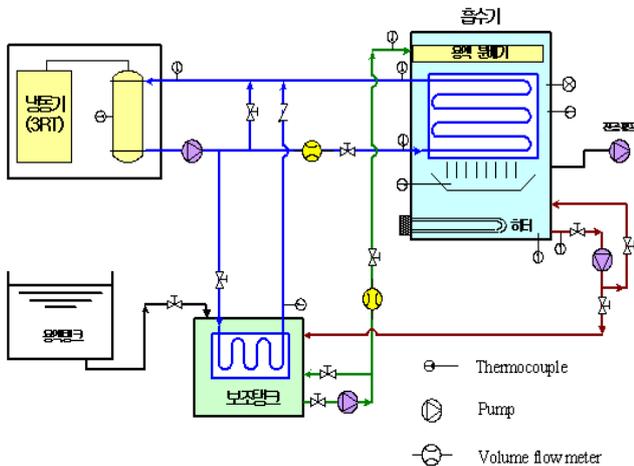


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

Table 1 Experimental conditions.

| | |
|--|--------------------------------|
| Inlet concentration of solution(% of LiBr) | 55 |
| Kinds of nano-particles (diameter : 20 nm) | Al ₂ O ₃ |
| Kinds of surfactant | 2E1H |
| Concentration of nanoparticle(wt%) | 0.01 |
| Concentration of surfactant(ppm) | 150 |
| Concentration of Arabic gum(wt%) | 0.01 |
| Inlet temperature of solution(°C) | 40 |
| Inlet temperature of coolant(°C) | 24~28 |
| Internal pressure(bar) | 0.01 |

로부터 나온 용액은 전열관과 열교환을 한 후 온도 측정을 위해 전열관 아래에 설치된 용액 받이에 고이게 된다.

냉동기로부터 공급되는 냉각수는 30%의 에틸렌글리콜수용액으로써 보조탱크와 흡수기로 분배되어 흐르게 된다. 흡수기로 공급되는 냉각수의 경우 전자유량계를 이용하여 그 유량을 측정하였다. 냉각수와 용액의 유량조절은 각 부분의 입구 밸브로 조절하였고 각 배관마다 바이패스 배관을 설치하여 보다 효과적인 유량조절을 할 수 있게 하였다. 또한 각 유닛의 입·출구와 주요부분에 RTD를 설치하여 온도를 측정하였다. 온도는 흡수기와 보조탱크에 설치된 히터의 온/오프 제어와 일정온도로 세팅이 가능한 3 RT급 냉동기를 이용하여 제어하였다. 유량과 온도데이터는 데이터 로거를 통해 수집되고 컴퓨터로 저장되어 처리된다.

3. 실험조건 및 방법

본 실험에서는 첨가제의 종류에 따른 이성분 나노유체 열 및 물질전달 특성을 비교하였다. 이성분 나노유체에 첨가된 입자의 농도는 분산안정성이 비교적 양호한 0.01 wt%를 선정하여 실험

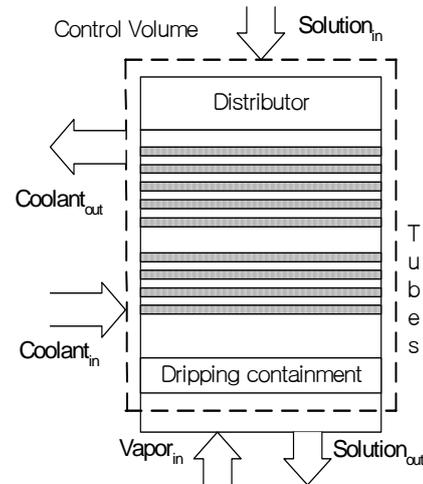


Fig. 2 Control volume.

하였고 첨가제로는 분산안정제로 널리 쓰이고 있는 고분자 화합물인 아라빅검과 계면활성제인 2E1H(2-Ethyl-1-Hexanol)을 사용하였다. 분산안정제인 아라빅검은 0.01 wt%의 농도로 첨가하였고, 2E1H은 Kulankara와 Herold⁽⁶⁾의 연구에 따라 표면 장력이 안정화 되는 적정 농도인 150 ppm을 선정하여 실험하였다. 이러한 농도조건에서 용액유량변화에 따른 흡수율과 열전달율의 변화를 관찰하였다.

용액 입구 온도는 실제 흡수기의 온도와 유사한 범위로 설정했으며, 그에 따라 냉각수 입구온도는 용액 입구온도와 일정한 온도차를 유지하면서 변화하게 된다.

Table 1에 실험조건을 정리하였고 온도 및 유량 측정 시 실험오차를 각각 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 와 $\pm 0.001 \text{ kg/s}$ 로 계산하였다.

4. 실험결과 처리

시험부에 대한 Fig. 2의 검사체적에 대하여 질량, 농도, 에너지 평형식을 고려하여 실험결과를 처리하였다.

검사체적 내 질량평형

$$\dot{m}_{sol, in} + \dot{m}_v = \dot{m}_{sol, out} \quad (1)$$

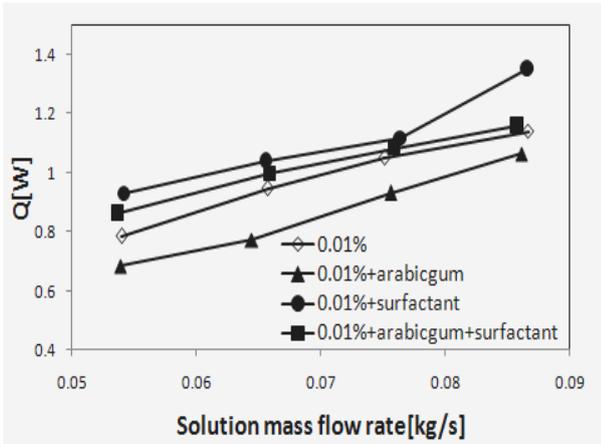


Fig. 3 Heat Transfer rate versus solution mass flow rate of Al_2O_3 binary nanofluids in adding additives.

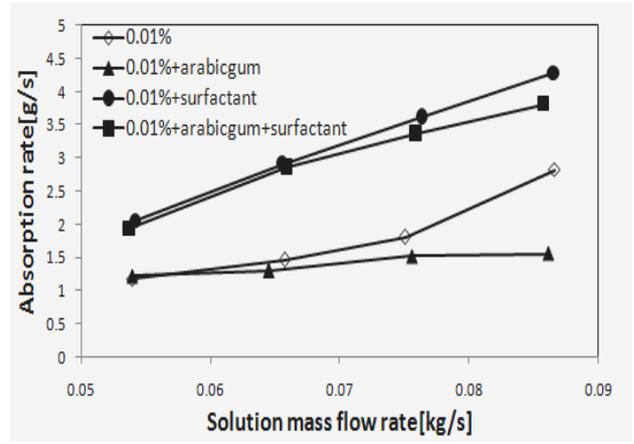


Fig. 5 Vapor absorption rate versus solution mass flow rate of Al_2O_3 binary nanofluids in adding additives.

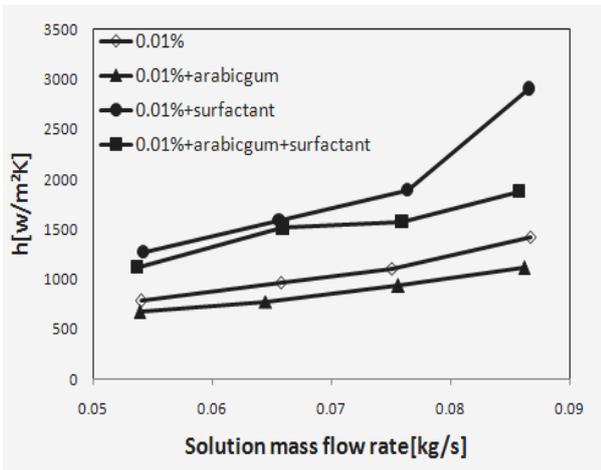


Fig. 4 Heat transfer coefficient versus solution mass flow rate of Al_2O_3 binary nanofluids in adding additives.

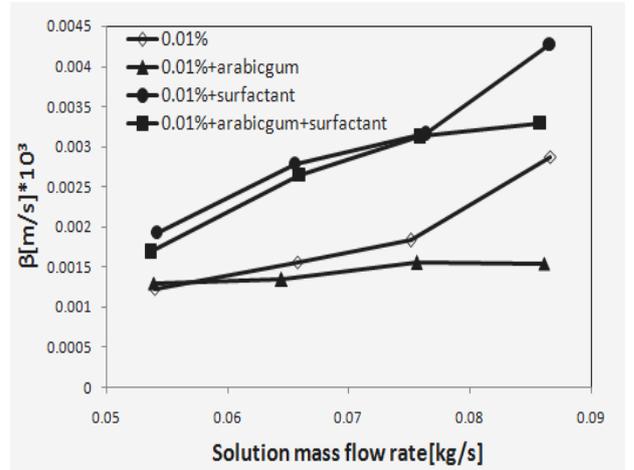


Fig. 6 Mass transfer coefficient versus solution mass flow rate of Al_2O_3 binary nanofluids in adding additives.

검사체적 내 농도평형

$$x_{in} \dot{m}_{sol, in} = x_{out} \dot{m}_{sol, out} \quad (2)$$

에너지 평형

$$\begin{aligned} Q_c &= \dot{m}_{cw, in} c_{pc} (T_{cw, out} - T_{cw, in}) \\ &= \dot{m}_{sol, in} H_{sol, in} - \dot{m}_{sol, out} H_{sol, out} + \dot{m}_v H_v \end{aligned} \quad (3)$$

5. 실험결과 및 고찰

5.1 열전달 성능

Fig. 3은 용액 유량에 따른 열전달량을 나타낸 그래프이다. 분산안정제인 아라빅검만을 첨가한 경우를 제외하고는 첨가제를 넣지 않는 경우보다 열전달 성능이 향상됨을 알 수 있다. 특히 이성분 나노유체에 2E1H를 첨가시킨 경우 최고 19%까지 증가됨을 확인하였다.

Fig. 4는 용액 유량에 따른 열전달 계수를 나타낸 그래프이다. 열전달계수도 아라빅검만을 첨가

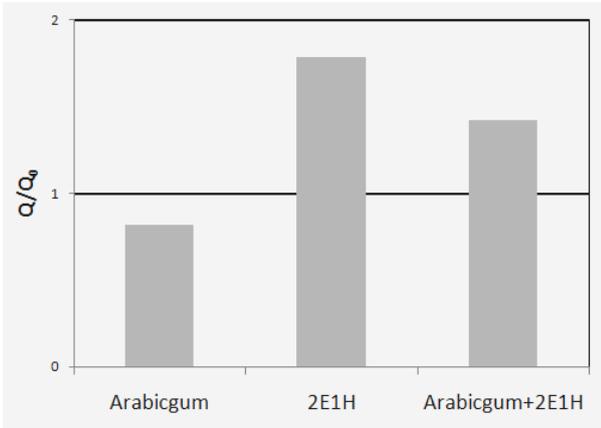


Fig. 7 Heat transfer enhancement.

한 실험을 제외하고는 크게 증가하였다. 이성분 나노유체에 아라빅검과 2E1H를 모두 첨가한 경우는 42% 증가를 보였고, 2E1H만을 첨가한 경우는 79%의 큰 증가를 보였다.

5.2 물질전달 성능

Fig. 5와 6은 용액유량에 따른 흡수율과 물질전달 계수를 나타낸 그래프이다. 물질전달 면에서도 아라빅검만을 첨가한 실험은 이성분 나노유체 실험에 비해 향상이 없고 2E1H를 첨가한 실험들은 크게 증가함을 알 수 있다. 흡수율은 아라빅검과 2E1H를 모두 첨가한 경우 65%, 2E1H만을 첨가했을 경우 77%로 크게 증가하였고, 물질전달 계수도 아라빅검과 2E1H를 첨가한 경우는 44%, 2E1H만 첨가했을 경우는 66%의 향상을 가져왔다.

5.3 첨가제에 따른 향상계수 비교

Fig. 7과 8에는 첨가제에 따른 이성분 나노유체의 열 및 물질전달 향상계수를 나타내었다. 아라빅검을 첨가하였을 때는 열 및 물질전달 성능이 오히려 감소됨을 알 수 있고 2E1H를 첨가하였을 경우는 성능 향상이 크다는 걸 알 수 있다. 고분자 화합물인 아라빅검이 이성분 나노유체 속에 녹아 들면서 고분자 체인을 형성하여 분산성을 높이지만 형성된 고분자 체인이 나노입자의 운동을 방해함으로써 열 및 물질전달 성능이 저하된 것으로 판단된다. 또한 계면활성제인 2E1H를 첨가하였을 경우 용액의 표면장력을 감소시킴으로

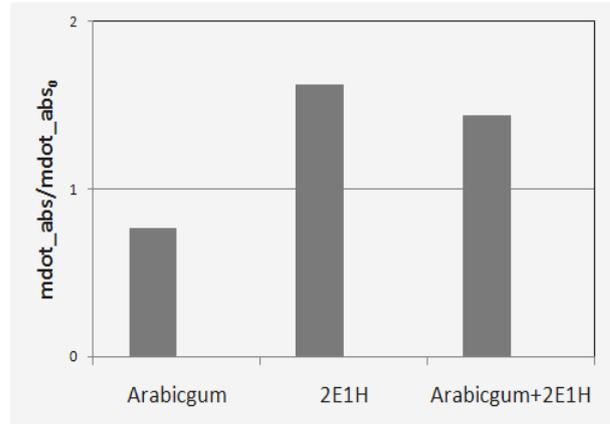


Fig. 8 Mass transfer enhancement.

써 마란고니 대류가 발생하게 되어 열 및 물질전달 성능이 크게 향상된 것으로 판단된다.⁽⁷⁾

6. 결론

본 연구에서는 기존 연구결과로부터 높은 열전도도 특성을 가진 것으로 알려진 Al_2O_3 나노입자와 나노입자의 분산성을 높여 주는 분산안정제인 아라빅검, 그리고 계면활성제인 2E1H를 첨가한 이성분 나노유체를 제조하여 실험하였다. 실제 흡수 시스템에 적용하기 위해 이성분 나노유체의 열 및 물질전달 특성에 미치는 첨가제의 영향에 대한 실험적 결과를 도출하였다. 이 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분산안정제인 아라빅검을 넣으면 첨가제가 없는 경우보다 열전달성능은 18%, 물질전달성능은 23% 감소가 되었다. 이는 아라빅검에 의해 고분자체인이 형성되고 이로 인해 나노입자의 운동이 방해되어 성능감소를 가져온 것으로 판단된다.
- 2) 첨가제를 첨가한 이성분 나노유체 열전달 실험결과 흡수율은 77%가 증가하였고, 열전달율은 19%가 증가하였다. 이는 계면활성제인 2E1H가 이성분 나노유체의 표면장력을 감소시킴으로써 마란고니 대류를 발생시켜 열 및 물질전달 성능이 크게 증가한 것으로 판단된다.

위의 결과로부터 흡수식 시스템의 작동유체로 이성분 나노유체에 계면활성제를 첨가하면 흡수기의 흡수성능을 향상시켜 전체 시스템 COP 상

승을 가져올 것으로 판단되므로 시스템의 작동유체로 계면활성제를 첨가한 이성분 나노유체의 사용이 추천된다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 에너지자원기술개발사업, 고효율 흡수식냉온수기 개발과제 (과제번호: 2005-E-BD011-P-02-3-020-2005)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kang, Y. T., Kunugi, Y., and Kashiwagi, T., 2000, Review of advanced absorption cycles ; Performance improvement and temperature lift enhancement, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 23, No. 5, pp. 388-411.
2. Kang, Y. T., Akisawa, A., and Kashiwagi, T., 1999, Experimental investigation of Marangoni convection in aqueous LiBr-H₂O solution with heat transfer additives," *ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, No. 4, pp. 1088-1091.
3. Lazzarin, R. M., Gasparella, A., and Romagnoli, P., 1996, Experimental report on the reliability of ammonia-water absorption chillers, *Revue internationale du froid*, Vol. 19, No. 4, pp. 247-256.
4. Kim, J. K., Jung, J. Y., and Kang, Y. T., 2006, Absorption performance enhancement by nano-particles and chemical surfactants in binary nano fluids, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 30(1), pp. 50-57.
5. Kang, Y. T., and Kim, J. K., 2006, Comparisons of mechanical, chemical treatments and nano technologies for absorption applications, *International Journal of HVAC&R Research*, Vol. 12 (3b) pp. 807-819.
6. Kulankara, S., and Herold, K. E., 2002, Surface tension of aqueous lithium bromide with heat/mass transfer enhancement additives: the effect of additive vapor transport, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 25 (3). pp. 383-389.
7. Kim, J., Choi, C. K. and Kang, Y. T., 2004, Instability analysis of Marangoni convection for absorption process accompanied by heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 10-11, pp. 2395-2402