

폼산칼륨 수용액 농도에 따른 액봉식 펌프의 진공성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Vacuum Performance of a Liquid Ring Vacuum Pump according to the Concentration of Potassium Formate Solution

김선화* · 이선기* · 문영빈** · 노영진* · 안석환****†

Seon-Hwa Kim*, Seon-Gi Lee*, Young-Bin Moon**, Young-Jin Roh*
and Seok-Hwan Ahn****†

(Received 12 July 2022, Revision received 08 August 2022, Accepted 09 August 2022)

Abstract : Liquid ring vacuum pumps using water as the liquid ring fluid (LRF) have a definite vacuum degree limiting characteristic according to the vapor pressure of water. As the degree of vacuum increases, the efficiency of the vacuum pump decreases rapidly, and it is difficult to have a lower vacuum pressure. Therefore, in order to solve the above problems, the substitute liquid ring fluid with properties of the low viscosity and low vapor pressure are selected to expand the usable vacuum area and improve energy efficiency. The liquid ring fluid in this study was potassium formate solution (PFS) and water, and the performance test was conducted at various concentrations of 0~70%. As a result, the vacuum performance decreased due to the increase in the internal temperature of the liquid ring vacuum pump for all liquid ring fluids. However, it has a lower vapor pressure than conventional water and the vacuum pressure of the pump is improved. In addition, it was observed that the pump performance improved as the concentration increased.

Key Words : Liquid ring vacuum pump, Liquid ring fluid, Potassium formate solution, Vacuum performance

****† 안석환(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9598-9995)

: 교수, 중원대학교 항공기계공학과

E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942

*김선화(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5587-2939) : 연

구소장, (주)한국에너지기술단

*이선기(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8321-2257) : 주

임연구원, (주)한국에너지기술단

*노영진(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9494-6491) : 대

표이사, (주)한국에너지기술단

**문영빈(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3772-8906) :

대학원생, 경상국립대학교 에너지기계공학과

****† Seok-Hwan Ahn(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9598-

9995) : Professor, Department of Aero Mechanical Engineering, Jungwon University.

E-mail : shahn@jwu.ac.kr, Tel : 043-830-8942

*Seon-Hwa Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-5587-2939)

: General Director of Technology, Korea Energy Technology Group.

*Seon-Gi Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8321-2257) : Associate Researcher, Korea Energy Technology Group.

*Young-Jin Roh(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-9494-6491)

: Associate Researcher, Korea Energy Technology Group.

**Young-bin Moon(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-3772-8906)

: Graduate Studeant, Department of Energy and Mechanical Engineering, Gyeongsang National University.

1. 서 론

대기압 이하로 작동되는 진공펌프는 오일식 펌프가 주로 사용되었지만,¹⁾ 수분이 있는 기체나 부식성 기체인 작동유체를 다룰 때 기름이 열화로 인해 배기속도 및 압력성능이 극도로 나빠진다. 이런 문제를 해결하기 위해 개발된 것이 액봉식 진공펌프(Liquid ring vacuum pump; LRVP)이다. 액봉식 진공펌프의 특성은 내부에 급유할 필요가 없어 수분이 포함된 기체나 수소, 아세틸렌, 메탄올 등과 같은 폭발성 가스를 취급에 있어서도 장점이 있다. 따라서 제지공업, 진공 여과기용 등 다양한 공정에 쓰인다.²⁻³⁾

하지만, 물을 봉입유체(Liquid Ring Fluid, LRF)로 이용하는 기존의 LRVP의 경우, 물의 증기압에 따른 명확한 진공도 한계 특성을 갖게 된다. 진공도가 높아질수록, 즉 절대압력이 낮아질수록 진공펌프 효율이 급격히 감소할 뿐만 아니라, 더 낮은 증기압력을 갖기 어려운 문제가 발생한다. 이와 같은 문제는 주로 봉입유체의 열적 특성과 관련이 있다. 운전중 내부 봉입유체의 온도가 높아져 일정 증기압(Vapor pressure)에 도달하면 펌프 내부에서 물은 대기압 환경보다 더 낮은 온도에서 끓기 시작한다. 이로 인해 펌프 내부에는 원심력에 의해 형성된 액체 링에 공동현상(Cavitation)이 발생하여 충분한 진공상태를 유지할 수 없는 상태가 되며 진공성능이 하락하게 된다. 특히 공동현상은 진공상태에서 기포가 발생하여 나타나는 현상으로 심각할 경우 임펠러의 손상이 발생할 수 있다.⁴⁻⁵⁾ 따라서 이러한 문제점을 줄이기 위해서는 압력뿐만 아니라 LRF의 온도를 함께 고려해야 한다. 하지만 기존의 LRVP의 성능실험은 대부분이 펌프 임펠러에 대한 실험 및 연구이며 다른 기술적 문제에 관한 연구는 미흡한 상황이다. 또한 기존 LRF로 사용되는 물에 비해 낮은 증기압과 저점도를 가지는 LRF의 다양한 운전환경에서 운전 성능을 예측하기 위해서는 기초데이터가 요구된다.⁶⁻⁸⁾

Stephen Atkinson은 그의 발명으로부터 폼산칼륨 수용액(Potassium Formate Solution, PFS)이 복합체가 없는 상태에서 금속에 대한 낮은 부식성

을 가지고 있고 증기압 강하를 유도할 수 있음을 발견했다.⁶⁾ 또한 폼산 칼륨은 생분해되고 환경적이며 독성 수준을 가지며 자연 알칼리성 pH를 가지고 있다. PFS의 제조는 가급적 용액에 함유된 폼산 칼륨의 총 농도 기준 40~90%로 하여야 하며, 용액 중량 기준 40~75%가 바람직하다고 알려져 있다.⁶⁾ 이에 LRVP에 사용되는 LRF에 관련한 연구들에서는, Chen et al.은 PFS를 이용한 제습 시스템 성능을 분석하였다. 공기 온도가 30~45°C 범위인 조건과 유입풍속을 0.65 m/s에서 4.5 m/s로 변화시켜 제습 현감 및 잠복효과, 수분제거율의 변화를 연구하였다.⁹⁾ Long와 Gaspardelle는 1~80°C의 온도 범위에서 60~80% 농도의 PFS의 열전도율 및 동점도를 측정하였다.¹⁰⁾ Longo와 Fedele은 5~75°C에서 60~80% 농도의 PFS의 평형 증기압을 측정했다.¹¹⁾ Wen et al.은 농도가 65~74%인 PFS에 대해 20~65°C에서 밀도, 열전도도, 동점도, 열용량 및 증기압을 포함하여 열적 특성에 관한 포괄적인 연구를 수행하였고,¹²⁾ Shin et al.은 제습기의 흡착성능을 높이기 위한 제습 로터의 열 및 물질 전달 현상에 관한 연구를 수행하였다.¹³⁾ 또한 제습을 위한 유체 시스템의 성능을 예측하고 이를 운전하기 위한 중요 운전점을 찾기 위해 1D, 3D 수치해석을 통한 모사실험에 관한 연구도 활발하다.¹⁴⁻¹⁵⁾

본 연구의 목적은 LRVP의 LRF에 대한 연구로서 수용액의 농도에 따른 진공성능 특성을 고찰하고자 한다. 또한 선정된 LRF의 특성을 이용하여 활용 가능한 진공 범위를 확장하고 에너지 효율을 향상하고자 한다. 기존 LRF로 사용되는 물에 비해 낮은 증기압과 점도가 낮은 LRF를 찾고, 이 LRF가 진공 성능에 미치는 영향을 알아보하고자 한다. LRF로 사용하기 위해서 높은 온도와 다양한 농도에서의 기초데이터가 요구된다. 본 연구에서는 LRF의 사용을 위하여 PFS를 적용하고 농도 변화에 따른 특성을 비교 및 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

본 연구에서 사용된 LRF는 PFS이다. 이것은 저

Table 1 Properties of potassium formate solution (w/w, %)⁶⁾

Concentration of PFS (%)	Viscosity (cP)	Density (kg/m ³)
20	1.2	1.12
30	1.5	1.16
40	1.9	1.27
50	2.4	1.36
60	4.6	1.44
70	10.0	1.53

Table 2 Vapor pressure potassium formate solution⁶⁾

Temperature (°C)	Concentration of PFS (%)				
	0	20	40	60	70
	Vapor pressure (mbar)				
10	12.3	4.8	1.9	0.9	0.8
30	42.5	22.7	12.4	5.5	3.9
60	199.3	178.0	143.0	109.0	107.0
90	701.2	667.0	545.0	449.0	362.0

Table 3 Vapor pressure of water

Temperature (°C)	Vapor pressure (mbar)
10	12.3
30	42.5
60	199.3
90	701.2

럽하고 안전하며 부식성이 없는 친환경적 특성이 있어서 냉동 및 공조 응용 분야에서 건조제, 흡수제 및 2차 냉매의 대안으로 주목받고 있다. PFS의 기본적인 화학 성분은 Stephen Atkinson의 특허에서 제시한 값을 참조하였으며, 주요 물성치와 증기압 정보를 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 또한 기존의 LRF로 사용되는 물의 증기압은 Table 3에 나타내었다.⁶⁻⁷⁾

2.2 실험장치

시험설비는 우선 PFS를 제조할 수 있는 설비와 LRVP의 성능시험을 위한 설비로 구분된다. LRVP

Table 4 Specifications for the experimental equipment

Equipment	Specification
Liquid ring vacuum pump	27 mbar
Pressure gauge	-1~7 bar
Temperature sensor	0~100°C

의 성능시험을 위한 설비는 크게 흡입부, 진공펌프부, 토출부로 이루어져 있다. 흡입부는 진공이 형성되는 용기(Vessel)가 설치되어 있고 압력을 측정하기 위해 Pressure Transmitter가 설치되었다. 진공펌프부는 LRVP에 PFS공급을 위한 Water pump로 이루어져 있고, LRF의 온도를 측정하기 위한 Thermocouple이 설치되었다. LRVP는 인버터에 연결되어 속도제어를 할 수 있도록 제작되었다. 다만, 본 연구에서는 정격(최대)속도로 운전하여 최대도달 진공범위를 확인하였다. 실험에서 사용된 LRVP는 DWV-550(DOOVAC Co., Korea)를 사용하였으며, 최대진공압력 27 mbar의 성능을 가지고 있다. 실험에 사용된 주변기기들은 펌프 사양에 맞게 구성하였으며 사용된 계측기는 NPG-2(NOVA Co., Korea)를 사용하였다. 또한 데이터의 정확성을 위해 절대압계 교정작업 표준(PDK-CCP-P06)에 따라 표준 기기를 사용하여 14~50 mbar 압력 범위에 대해 비교교정을 하였다. 주요기기의 상세 사양은 Table 4에 나타내었다. Fig. 1과 2는 각각 시스템 개념도 및 실제 시험설비 형상을 나타내고 있다.

2.3 실험방법

우선 PFS를 각 농도별로 제조하여 농도에 따라 최대 도달 가능한 진공도를 각각 확인하였다. 이때 유체의 온도는 고정되어야 한다. 또한 시간이 경과함에 따라 진공압력의 추이를 확인하였다. 다음으로 온도에 따른 진공성능을 관찰하였다. 실제 LRVP설비는 지속적으로 운전되면서 내부적, 외부적으로 LRF의 온도를 변화시킬 수 있고, 이것은 LRF의 증기압력에 영향을 미치기 때문이다.

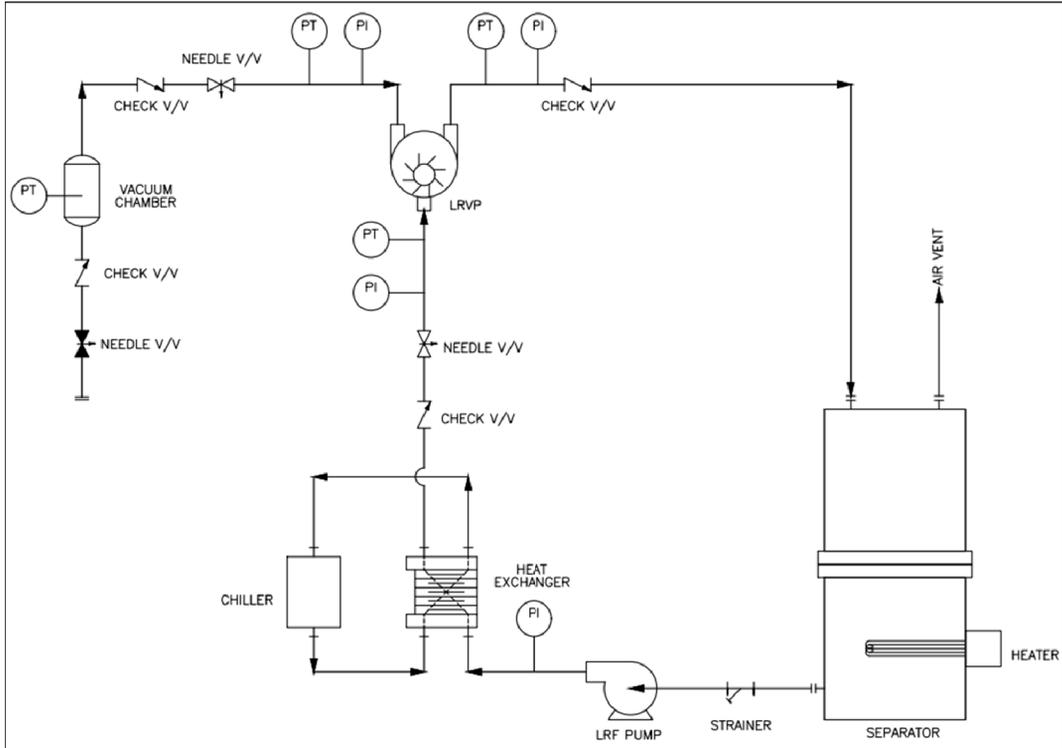


Fig. 1 Schematic diagram of LRV experimental equipment

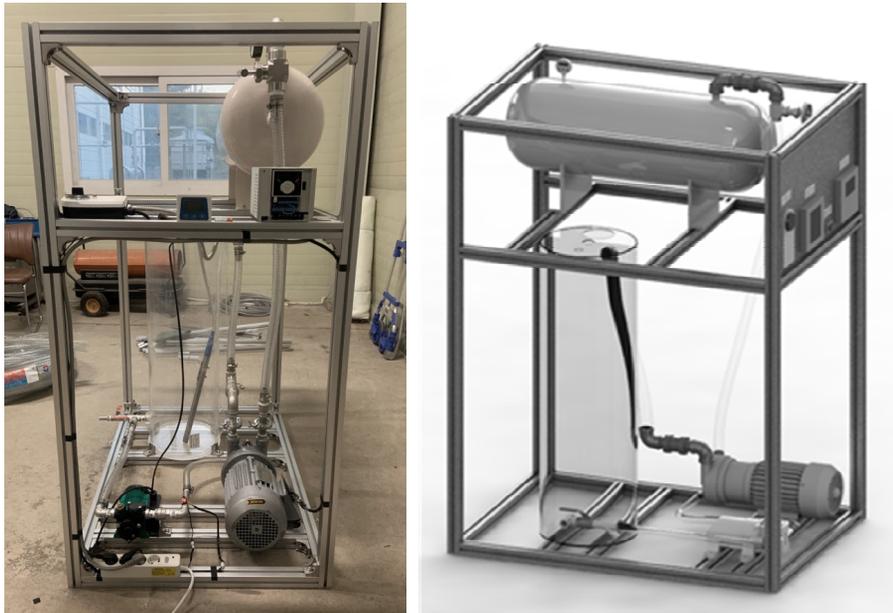


Fig. 2 Photograph of LRV experimental equipment

수용액은 플라스크에 폼산칼륨 분말과 물을 섞어 농도별로 제조하였으며, 정확한 제조를 위해 0.01 g의 정밀도를 가지는 전자저울을 이용하여 측정하였다. 용액에 녹아 있는 용질의 질량을 백분율로 나타낸 퍼센트 농도(w/w, %) 기준으로 0%, 10%, 40% 및 70% 수용액을 제조하였다. 즉 PFS의 농도에 따른 변수를 4가지 경우로 설정하였다.

실험을 위해 초기온도는 15°C로 설정하고, 압력 및 온도 측정은 1초 간격으로 기록하였다. 진공효율은 진공상태 도달 후 진공압력을 기준으로 기존 LRF를 사용하였을 때의 값과 PFS의 값의 비로서 정의하였다. Fig. 3에는 실험 절차를 도식화하여 나타내었다.

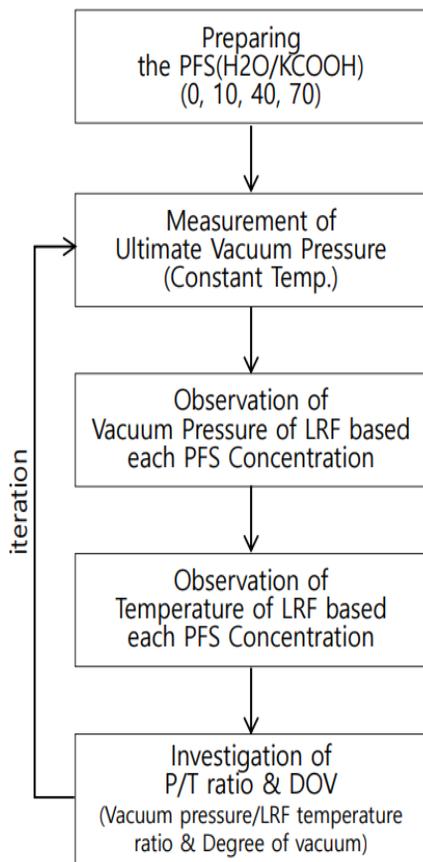


Fig. 3 Experimental procedure

3. 결과 및 고찰

3.1 농도에 따른 최대진공압력

LRF의 PFS 농도변화에 따른 LRVP의 진공 성능을 확인하기 위해 0%, 10%, 40%, 70%의 각각 4가지의 농도로 제조된 PFS를 LRF로 적용하였다. LRVP의 성능은 도달 가능한 진공도(절대압력을 표기)로 나타내었고, 3차례의 반복 실험을 통해 그 평균값으로 표기하였으며, Fig. 4에 그 결과를 나타내었다.

아래 식 (1)은 최대압력과 PFS의 농도에 관한 관계식을 나타낸다.

$$P = f(C) \tag{1}$$

여기서 P는 진공압력, C는 PFS의 농도를 나타낸다. 즉, LRVP에 형성되는 진공압력은 PFS의 농도의 함수이다. PFS 농도가 0% 및 10%인 경우의 최대도달 진공 압력(절대압력) 값을 살펴보면 유사한 경향을 나타내었다. 반면, 농도가 40% 및 70%인 경우 확연하게 감소하는 경향을 보였다. PFS의 농도가 어느 정도 커지면 필요한 최대진공압력이 감소함으로써 진공성능이 향상된다. 이것은 수용액의 끓는 온도가 증가하여 진공 성능이 향상되는 것으로 판단된다. 즉 PFS의 농도가 증가함에 따라 최대진공압력 수준이 상승하는 결과는 선행 연구결과와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다.⁵⁾ 특히 농도 70%인 경우에는 농도 10%일 때의 최대진공압력에 비해 거의 1/2 수준으로 나타나 진공 성능이 현저히 상승하여 효과가 있는 것으로 확인되었고, 이는 농도의 증가에 따른 수용액의 끓는점 변화임을 통해 진공압력과 LRF의 증기압 및 운전온도와 LRF의 증발온도와의 관계가 시스템의 중요한 Set Point임을 알 수 있다.

Fig. 5는 PFS 농도를 다르게 한 LRF에 의한 LRVP의 진공압력 거동을 시간에 따라 나타내었다. 시간이 지남에 따라 물 및 PFS의 진공압력이 현저히 감소함으로써 진공 성능이 향상되고 있는 것을 확인할 수 있었고, 특히 PFS의 농도가 높아

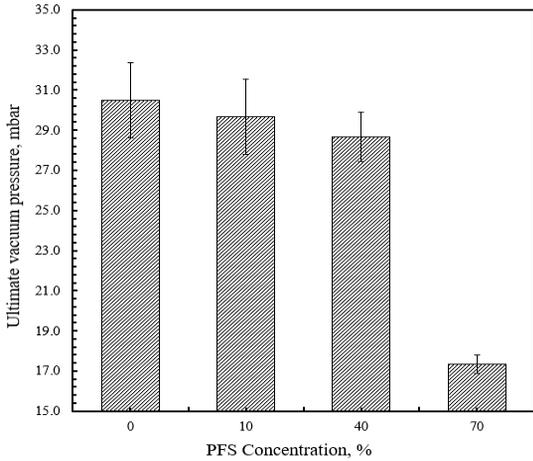


Fig. 4 Available absolute pressure according to the concentration of PFS

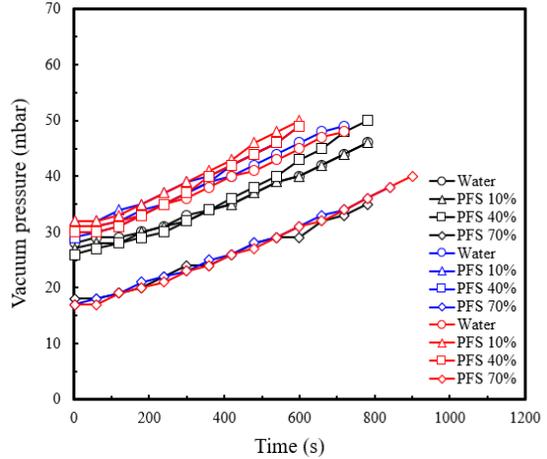


Fig. 6 Comparison of vacuum pressure with time of the concentration of PFS

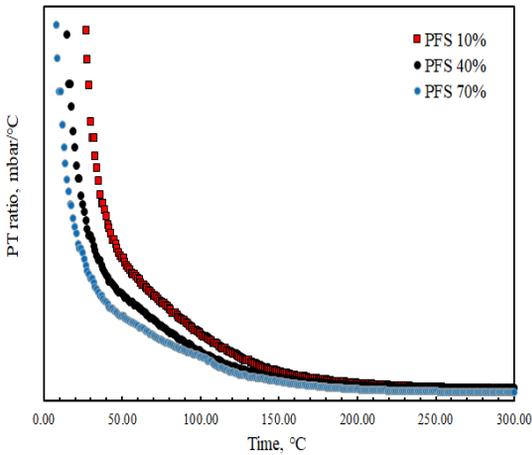


Fig. 5 Variation of P/T ratio (vacuum pressure/LRF temperature) according to the concentration of PFS

질수록 더 낮은 진공 영역을 형성하는 것을 알 수 있다.

각각의 조건으로 적용된 LRF에 따라 진공압력 수준을 비교하기 위해 최대진공압력 후 1분 주기마다 진공압력을 비교 관찰하여 Fig. 6에 나타내었다. 각 LRF의 진공압력은 시간이 경과함에 따라 증가하였다. 진공압력의 증가 양상은 유사한 경향을 나타내었고, PFS의 농도가 낮을수록 높은

진공압력을 나타내었다. PFS 농도 10%의 경우는 물에 비해 진공압력이 높게 나타났으나 40% 및 70%는 물에 비해 진공압력이 낮았다. 또한 PFS의 농도가 낮아질수록 진공압력이 높았다. 이는 농도가 높아질수록 LRF의 증기압이 낮아지며 점성이 높아지는 특성으로 나타나는 현상으로 판단된다.

3.2 온도에 따른 진공 성능

PFS의 농도변화에 따른 온도의 영향성을 확인하기 위해 온도 변화를 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7로부터 알 수 있듯이 모든 LRF는 시간이 경과함에 따라 온도가 상승하는 것을 알 수 있었다. PFS의 경우, 물에 비해 온도 상승률이 높았으며, 농도가 증가할수록 온도 상승의 정도가 증가하는 경향을 보였다.

또한 진공성능에 미치는 온도의 영향을 보고자 온도에 따른 진공압력의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 모든 LRF에서 온도가 증가함에 따라 압력이 증가함으로써 진공성능이 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 진공성능의 저하를 방지하기 위해 온도 유지가 요구된다. 식 (2)는 LRF의 진공압력과 온도의 관계식을 나타낸다.

$$P = f(T) \tag{2}$$

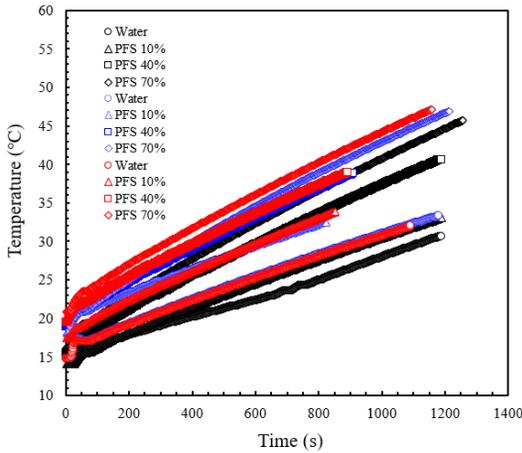


Fig. 7 Comparison of temperature with time of the concentration of PFS

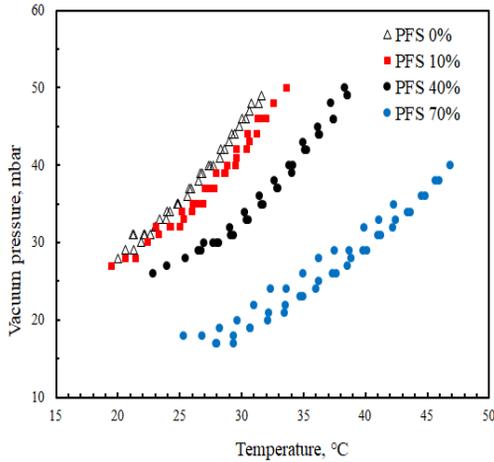


Fig. 8 Variation of vacuum pressure with the temperature of LRF based concentration of PFS

여기서 P는 진공압력, T는 LRF의 온도를 나타낸다. 즉, LRPV에 형성되는 진공압력은 LRF의 온도의 함수이다. LRF에 미치는 온도의 영향을 살펴보면 온도가 증가함에 따라 모든 LRF에 대해 진공압력이 상승하였지만, 같은 온도조건에서 PFS의 농도가 증가할수록 진공압력이 낮게 나타났다. 농도가 증가함에 따라 진공 성능이 향상됨을 알 수 있다. 따라서 온도 상승과 함께 기존 LRF인 물과 비교하면 모든 PFS의 경우, 진공도가

높음을 유지하고 있다. PFS의 농도 70%의 경우에는 다른 농도보다도 더 높은 온도 영역에서도 진공도를 유지하고 있다고 판단되므로 PFS의 농도를 높이면 적절한 온도를 유지할 경우 충분한 진공 범위로 확장이 가능할 것으로 판단된다.

진공도(Degree of vacuum)는 진공의 정도를 나타내는 지표로써 진공성능 평가에 있어서 중요한 지표 중 하나이다. 진공도는 대기압 상태를 0%, 절대 진공압력을 100%로 나타내는 방법이다. LRF에 대한 진공 성능을 좀 더 면밀히 고찰하기 위해 다음 식 (3)과 같이 진공도를 정의하였다.

$$DOV = \left(1 - \frac{P_v}{P_a}\right) \times 100\% \quad (3)$$

여기서 DOV, Pa 및 P_v는 각각 진공도, 대기압 및 진공압력을 나타낸다. Fig. 9에는 각각의 LRF에 대하여 온도 변화에 따른 진공도를 비교한 결과를 나타내었다. 온도가 상승함에 따라 모든 LRF의 진공도가 감소하여 진공 성능을 잘 유지하였으나, 물과 농도 10%의 PFS 및 농도 40%의 PFS의 경우, 온도의 상승에 따른 진공도가 비교적 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다. 농도 70%의 PFS의 경우, 초기 약 98%로 가장 높은 진공도를 나타내었으며, 온도 상승에 따른 진공도의 감소가 다른 LRF에 비해 비교적 적었고, 진공도의 최저값을 나타내는 온도 영역이 비교적 높았다.

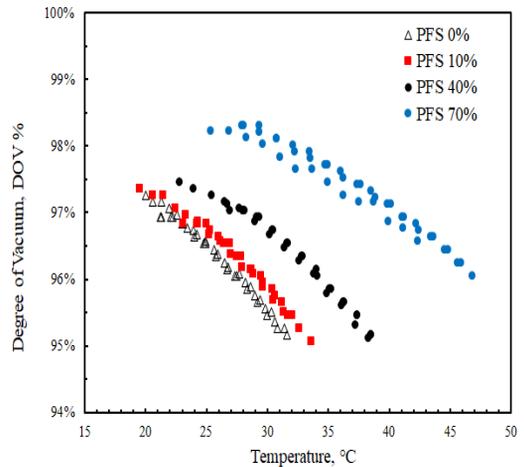


Fig. 9 DOV according to the operating temperature

4. 결 론

본 연구에서는 LRVP의 활용범위를 넓히기 위해 새로운 LRF를 선정하여 진공성능을 알아보기 위한 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 모든 농도의 PFS의 최대진공압력은 3차례의 반복 실험을 한 결과, PFS의 농도가 증가할수록 진공도가 높아짐을 확인하였다.

2) 온도가 증가할수록 최대도달 진공압력 값이 낮아져 LRF의 진공 성능이 감소하였지만, PFS의 경우 물과 비교하면 더 높은 온도 영역에서 양호한 진공 성능을 유지하였다.

3) LRF의 농도가 0%, 10% 및 40%의 경우 모두 온도 상승에 따라 진공도가 감소하는 것을 알 수 있었다. 특히 농도 70%의 폼산칼륨 수용액의 경우, 온도 상승에 따른 진공도의 감소가 다른 LRF에 비해 작았으며, 진공도의 최솟값을 나타내는 온도 영역이 높았다.

4) 본 연구는 통해 PFS의 농도를 적절히 조절함으로써 LRVP의 LRF 증기압을 제어할 수 있음을 나타내었다. LRF의 운전온도와 운전농도를 예측한다면, 본 논문에서 제시한 결과를 통해 넓은 범위의 LRVP 압력 제어가 가능하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2022년도 과학기술정보통신부의 지원으로 2022년 연구개발특구육성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-DD-RD-0476).

Author contributions

S. H. Kim; Conceptualization. S. H. Kim & S. G. Lee & Y. B. Moon; Data curation. S. H. Ahn & Y. B. Moon; Formal analysis. Y. J. Roh; Funding acquisition. S. H. Kim & S. G. Lee; Investigation. S. H. Kim & S. H. Ahn; Methodology. S. H. Kim & Y. J. Roh; Project administration. S. H. Ahn;

Resources. Y. B. Moon; Software. Y. J. Roh; Supervision. S. H. Kim & S. H. Ahn; Validation. S. H. Kim & S. G. Lee; Visualization. S. H. Kim & S. H. Ahn; Writing-original draft. S. H. Ahn; Writing-review & editing.

References

1. V. Mathaiyan and D. W. Jung, 2021, "Theoretical Investigation and Modelling of Microjet in Cavitation", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 94-100. (<https://doi.org/10.9726/kpspe.2021.25.1.094>)
2. A. Roth, 2012, "Vacuum technology", Elsevier.
3. G. H. GO et al., 2001, "A Numerical Analysis of cleat and Mass Transfer on the Dehumidifier of Liquid Desiccant Cooling System", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 25, No. 12, pp. 1756-1765.
4. Y. V. Rodionov, Y. T. Selivanov, D. V. Nikitin, M. A. Mahmood and N. V. Mikheev, 2021, "Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression", *Chemical and Petroleum Engineering*, Vol. 57, No. 5, pp. 477-483.
5. P. E. Keith Webb, "Vacuum System Troubleshooting", *Tuthill Vacuum & Blower Systems*.
6. S. Atkinson, 1998, U.S. Patent No. 5,846,450. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
7. S. Zhang, J. Luo, R. Zheng, X. Wang, G. Chen and Q. Wang, 2020, "Vapor Pressure of Aqueous HCOOK Solution as Working Fluid of an Absorption Heat Transformer at High Temperature", *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 65, No. 2, pp. 561-566. (<https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00745>)
8. N. Le Pierres, F. Huaylla, B. Stutz and J.

- Perraud, 2017, "Long-Term Solar Heat Storage Process by Absorption with the KCOOH/H₂O Couple: Experimental Investigation", *Energy*, Vol. 141, pp. 1313-1323.
(<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.111>)
9. X. Chen, Y. Su, D. Aydin, H. Bai, H. Jarimi, X. Zhang and S. Riffat, 2018, "Experimental Investigation of a Polymer Hollow Fiber Integrated Liquid Desiccant Dehumidification System with Aqueous Potassium Formate Solution", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 142, pp. 632-643.
(<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.003>)
 10. G. Longo and A. Gasparella, 2016, "Experimental Measurement of Thermophysical Properties of H₂O/KCOOH (Potassium Formate) Desiccant", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 62, pp. 106-113.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.10.004>)
 11. G. Longo and L. Fedele, 2018, "Experimental Measurement of Equilibrium Vapor Pressure of H₂O/KCOOH (Potassium Formate) Solution at High Concentration", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 93, pp. 176-183.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.06.015>)
 12. T. Wen, M. Wang, Y. Chen, W. He and Y. Luo, 2019, "Thermal Properties Study and Performance Investigation of Potassium Formate Solution in a Falling Film Dehumidifier/Regenerator", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 134, pp. 131-142.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.031>)
 13. H. G. Shin and I. S. Park, 2013, "Heat and Mass Transfer in Hygroscopic Rotor During Adsorption and Desorption Process", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 37, No. 11, pp. 977-984.
(<https://doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.11.977>)
 14. E. A. Jeong, K. Y. Lee and S. N. Yun, 2019, "A Study on Flow Analysis of Hollow Fiber Membrane Module for Pneumatic System Dehumidification", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 47-55.
(DOI:10.9726/kspse.2019.23.2.047)
 15. Y. J. Roh, S. H. Kim, S. G. Lee and E. C. Kang, 2022, "Numerical Analysis for the Heat and Material Balance in the Heat Exchanger with Heat Pump", *Journal of Power System Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 49-57.
(DOI:10.9726/kspse.2022.26.1.049)