

저온 및 고진공 조건에서 비응축 가스 탈기에 의한 수봉식 진공펌프의 흡입성능 저하 특성 연구

윤성태* · 김동현**†

Suction Performance Degradation of Liquid Ring Vacuum Pumps due to Non-condensable Gas Degassing under Low Temperature and High Vacuum Conditions

Sungtae Yun*, Donghyun Kim**†

Key Words : Liquid Ring Vacuum Pump(수봉식 진공펌프), Degassing(탈기), High Vacuum(고진공), Internal Gas Load(내부 가스 부하), Seal Water(밀봉수)

ABSTRACT

This study investigates the causes of suction performance degradation in a liquid ring vacuum pump under low temperature and high vacuum conditions. The internal gas behavior was analyzed in response to changes in seal water temperature. The results demonstrate that in high vacuum regions below 1.0 inHga, suction performance decreases despite lower temperature due to the degassing of dissolved gases. This internal gas load effect was dominant particularly under low flow conditions, as evidenced by changes in dissolved oxygen(DO) levels. These findings indicate that internal degassing, alongside vapor pressure, is a critical factor in determining pump performance during high vacuum operation.

1. 서 론

최근 펌프 관련 연구동향⁽¹⁾을 보면 대다수 연구가 수치해석 모델링에 집중되고 있다. 수봉식 진공펌프(Liquid Ring Vacuum Pump, 이하 LRVP)의 경우 관련 연구가 부족하고 특히 LRVP의 운전 변수에 따른 실증적 실험은 더욱 부족하다. LRVP는 구조가 단순하고 수분이 포함된 가스 흡입이 가능하여 산업 현장에서 널리 사용된다. LRVP의 성능은 내부 밀봉수(Seal Water)의 온도와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 밀봉수 온도가 낮을수록 포화증기압이 감소하여 LRVP의 유효 흡입 체적이 증가하고 성능이 향상된다.

그러나, 산업 현장에서는 겨울철에 냉각수 온도가 매우 낮은 경우, 포화증기압이 감소하여 제작사가 보증하지 못하는 흡입압력인 1.0 inHga 이하의 고진공 조건이 발생한다. 이러한 조건에서 LRVP는 포화증기압 도달까지 여유가 있음에

도 기대 성능에 미치지 못하거나 캐비테이션이 발생하는 사례가 있다. 이는 LRVP 내부의 성능 변화가 단순히 온도에 따른 포화증기압 변화만으로 설명할 수 없음을 의미한다.

기존의 연구들은 주로 LRVP의 내부 형상 변화⁽²⁾ 및 밀봉수 변화⁽³⁾ 등을 통해 흡입성능을 개선하는 연구를 수행하였으나, 운전 조건에 따른 비응축 가스의 용해도 변화와 그에 따른 탈기(Degassing) 현상이 LRVP 내부의 실제 흡입 체적에 미치는 영향 관련 연구는 부족하다.

본 연구에서는 저온 및 고진공 조건에서 LRVP의 흡입유량 변화가 LRVP 내부 메커니즘에 미치는 영향을 실험적으로 분석하고자 한다. 특히, LRVP 내부에서 발생하는 에어레이션(Aeration)과 탈기 현상이 용존산소(DO) 수치와 성능이력(Hysteresis)에 미치는 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 기존 포화증기압 중심의 성능 해석을 넘어, 비응축 가스의 내부 부하(Internal Gas Load) 관점에서 LRVP의 성능저

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

** 한화오션(Hanwha Ocean)

† 교신저자, E-mail : dhyunkim@hanwha.com

하 원인을 규명하고, 실제 운전 시스템에서 보충수(Make-up Water)가 수행하는 물리적 역할을 고찰하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 구성

본 연구를 위한 실험 장치는 LRVP를 중심으로 밀봉수 순환을 위한 장치⁽⁴⁾와 데이터 수집 장치로 구성되었다(Fig. 1). 실험에 사용된 LRVP의 정격 유량은 5.0 SCFM이며, 밀봉수 온도를 제어하기 위해 외부 칠러에 의해 냉각되는 열교환기를 밀봉수 순환 계통 내에 설치하였다.

LRVP 시스템의 특성을 확인하기 위해 시스템 내부에 다양한 위치에 계측기들을 배치하였다. 흡입 측에 압력 계측기와 토출 측에 유량 계측기를 설치하여 성능 변화를 실시간으로 측정하였다. 특히 LRVP 내부의 에어레이션과 탈기 메커니즘을 규명하기 위해 LRVP 밀봉수 유입 직전 배관과 LRVP 밀봉수 토출 직후 배관에서 각각 용존산소 계측기를 설치하여 밀봉수 내부의 가스 용해도 변화를 측정하였다. 실험에 사용된 주요 계측기들의 상세 사양 및 측정 정확도는 Table 1과 같다.

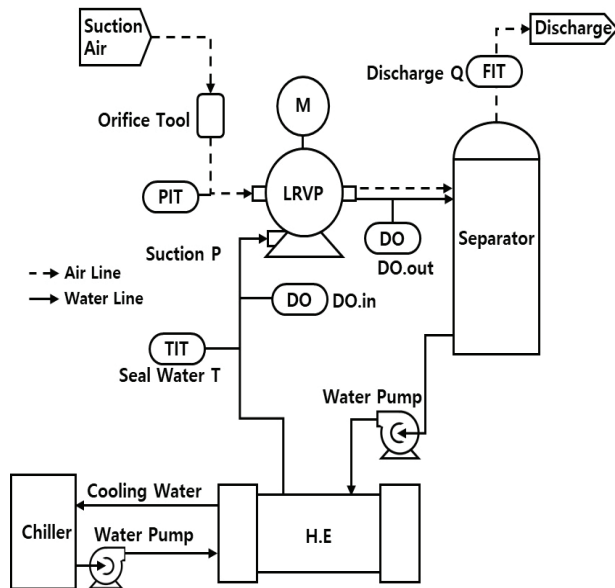


Fig. 1 Schematic of LRVP suction performance test

Table 1 실험 계측 장비의 주요 사양

계측 항목	장비명	측정 범위	정확도
토출 유량	다변수 볼텍스 유량계	0~10.0 SCFM	± 1.5% Reading
흡입 압력	절대압 트랜스미터	0~29.9 inHga	± 0.065% Full Scale
용존 산소	광학식 DO 센서	0 ppb~50.0 ppm	± 1 Digit

2.2 실험 조건 및 절차

실험은 외부 공기 흡입량과 밀봉수 온도 변화에 따른 LRVP의 성능 변화를 확인하기 위한 조건을 선정하였다. 유량의 경우 정격 유량인 5.0 SCFM과 20% 유량인 1.0 SCFM 조건을 수행하였다. 각 유량 조건에서 밀봉수 온도를 15°C, 10°C, 그리고 5°C까지 단계적으로 내리며 데이터를 계속하는 냉각 단계(Cooling Stage)와 5°C, 10°C, 그리고 15°C까지 단계적으로 올리는 가열 단계(Heating Stage)를 연속적으로 수행하였다. 모든 실험 과정에서 흡입압력, 토출유량, 밀봉수 온도 및 용존산소는 실시간으로 계속되어 수집되었으며, 필요시 각 밀봉수 온도 지점에서의 평균값을 분석에 활용하였다.

3. 결과 분석 및 고찰

3.1 비응축 가스 탈기의 이론적 메커니즘

LRVP 내부에서는 온도 및 압력 조건에 따라 에어레이션과 탈기가 발생한다(Fig. 2). 저온 및 고진공 영역에서 관찰되는 LRVP의 흡입성능 변화는 밀봉수 내 기체의 용해도 변화에 지배적인 영향을 받는다. 액체 내 기체의 용해도(C)와 분압(p) 사이의 관계는 식 (1)의 헨리의 법칙(Henry's Law)에 의해 정의된다⁽⁵⁾.

$$C = k_H \times P \quad (1)$$

여기서 k_H 는 온도에 의존하는 헨리 상수이다. 일반적으로 온도가 내려가면 k_H 가 증가하여 기체의 용해도는 상승한다. 그러나 본 실험 조건인 1.0 inHga 이하의 고진공 영역에서는 압력(P)의 감소폭이 온도로 인한 k_H 의 증가 효과를 상쇄

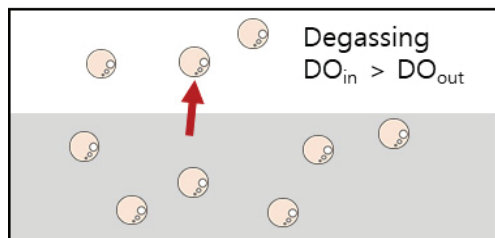
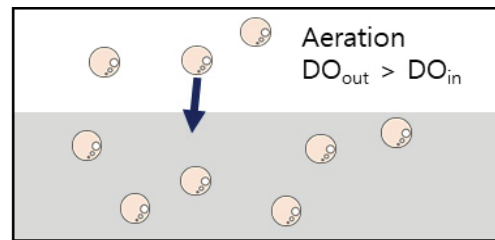


Fig. 2 Internal aeration and degassing of LRVP

Table 2 온도 저하에 따른 유량 조건별 물리 인자 및 평형 용존 농도의 정량적 비교

항목	고유량 조건 (5.0 SCFM)	저유량 조건 (1.0 SCFM)
운전 온도	15 → 5℃	15 → 5℃
흡입 압력(P)	1.45 → 1.35 inHga	0.96 → 0.73 inHga
헨리 상수(k_H)	$1.55 \times 10^{-3} \rightarrow 1.87 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^{-3} \rightarrow 1.87 \times 10^{-3}$
용해도(C)	$7.51 \times 10^{-3} \rightarrow 8.44 \times 10^{-3}$	$4.97 \times 10^{-3} \rightarrow 4.56 \times 10^{-3}$
용해도 변화량(ΔC)	$+0.93 \times 10^{-5} \text{ mol/kg}$	$-0.41 \times 10^{-5} \text{ mol/kg}$
물리 현상	에어레이션	탈기

할 만큼 지배적으로 작용한다. 이러한 압력 지배적 영역에서는 밀봉수에 용존 되어 있던 비응축 가스가 포화 상태를 넘어 급격히 방출되는 탈기 현상이 발생한다. 탈기된 가스는 LRVP 내부 임펠러 내부의 유효 흡입 체적은 점유하는 내부 가스 부하로 작용한다. 이는 결과적으로 저온 및 고진공 구간에서 성능 저하의 원인이 된다.

Table 2는 헨리의 법칙 식 (1)과 Fig. 2의 메커니즘을 기반으로 실제 운전 데이터를 수치 해석한 결과이다. 5.0 SCFM 조건에서는 온도의 영향이 우세하여 용해도 변화량 (ΔC)이 양수(+)로 도출되나, 1.0 SCFM 조건에서는 압력 강하 효과가 온도를 압도하여 변화량이 음수(-)로 반전된다. 이와 같은 정량적 수치 분석을 통해 고진공 영역에서 발생하는 압력 지배적 탈기 현상의 물리적 근거를 확인하였으며, 이러한 경향성을 바탕으로 이후 흡입성능 실험 결과를 분석하였다.

3.2 고유량 조건, LRVP 내부 에어레이션 주도 구간

공기 흡입량이 충분한 경우, LRVP는 내부 체적 변화에 따른 압축과 흡입이 발생한다. 이는 Fig. 3과 Fig. 4에서 확인할 수 있다. Fig. 3의 유량 계측 결과에서 온도가 15℃에서 5℃로 낮아질수록 유량의 완만한 상승을 확인할 수 있다. 이는 LRVP 내부의 포화증기압이 낮아지면서 유체 체적이 늘어나 더 많은 외부 공기를 흡입할 수 있기 때문이다. 5℃ 구간의 미세 흔들림은 상대적으로 높은 용해도를 가진 차가운 밀봉수가 LRVP 내부의 국부적인 저압 지점과 교차할 때 발생하는 미세 탈기와 재용해 사이의 충돌로 해석된다(Fig. 4).

LRVP 내부 에어레이션 현상이 발생하게 되면 DO_{out} 수치가 DO_{in} 보다 높게 측정되며, 이는 LRVP가 거대한 에어레이터 역할을 했음을 증명한다(Fig. 7).

3.3 저유량 조건, LRVP 내부 탈기 주도 구간

공기 흡입량이 부족한 경우, LRVP 내부는 고진공이 되고,

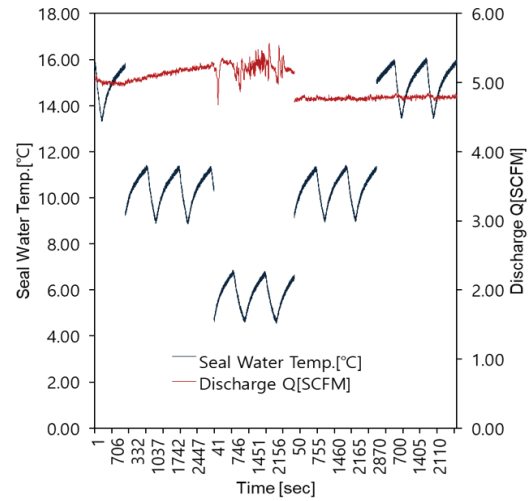


Fig. 3 LRVP discharge flow vs. seal water temperature(5.0 SCFM)

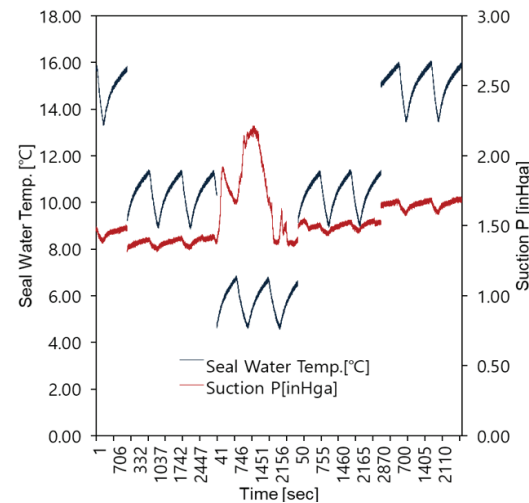


Fig. 4 LRVP suction pressure vs. seal water temperature(5.0 SCFM)

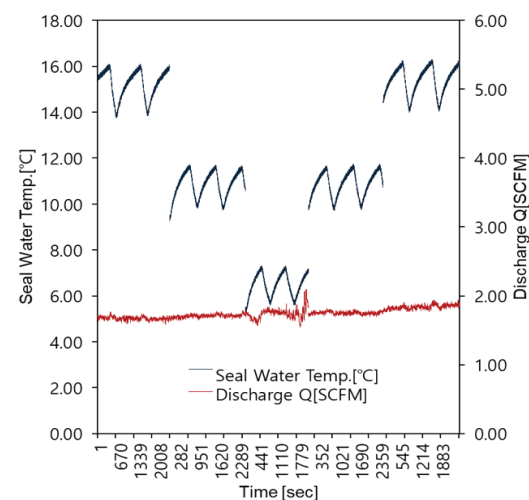


Fig. 5 LRVP discharge flow vs. seal water temperature(1.0 SCFM)

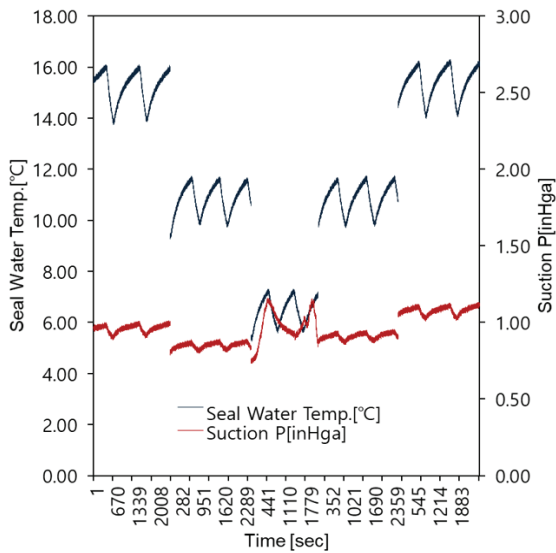


Fig. 6 LRVP suction pressure vs. seal water temperature (1.0 SCFM)

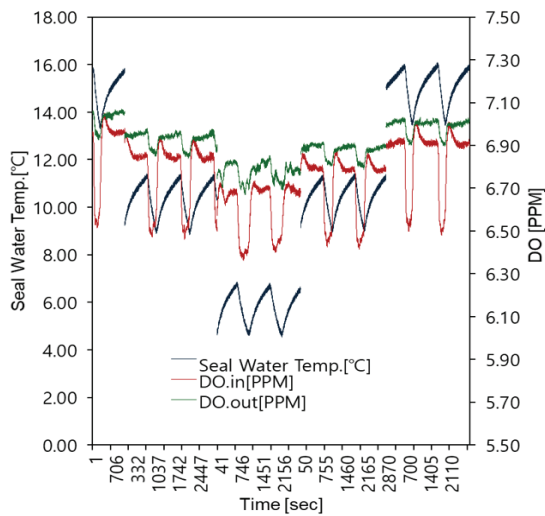


Fig. 7 LRVP DO vs. seal water temperature (5.0 SCFM)

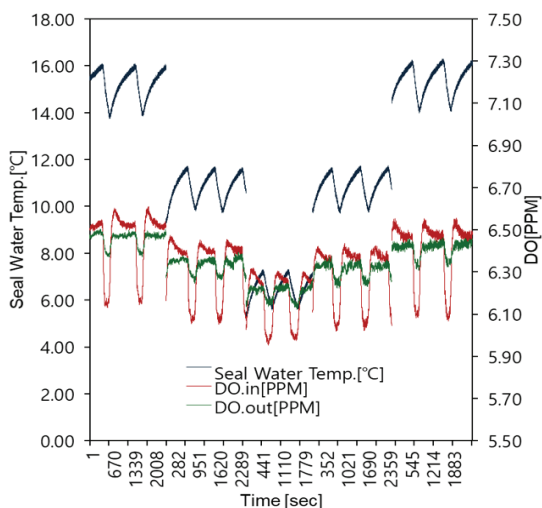


Fig. 8 LRVP DO vs. seal water temperature (1.0 SCFM)

이때 탈기된 내부 가스가 성능에 영향을 준다. 이는 Fig. 5와 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 1.0 inHga 이하의 고진공에 도달하면, LRVP 내부 밀봉수는 더 이상 가스를 붙들지 못하고 가스를 방출하는 압력 지배적 탈기 현상이 발생한다. 내부 탈기 가스는 임펠러의 빈 공간을 사전에 채워 외부 흡입 가스의 유효 흡입 체적을 잠식한다. 이는 내부 가스 부하의 증가와 실제 흡입성능 저하로 이어진다. Fig. 5에서 5°C에서 15°C까지 온도가 올라갈 때 유량이 상승하는데 밀봉수 내 잔류 가스가 이미 배출되어 내부 가스 부하가 일시적으로 감소했기 때문이다.

고진공 상태인 흡입 구간(DO_{in} 위치)에서 탈기 현상이 발생한다. 하지만 유입되는 공기량이 적어 압축 시 다시 녹아 들어가기 위한 산소 공급원이 부족하다. 따라서 DO_{out}이 DO_{in}을 추월하지 못하는 수치 역전 현상이 발생한다(Fig. 8).

3.4 펌프 내부의 이력 현상

3.4.1 고유량 조건에서 가스 포화 및 성능 저하

Fig. 9는 고유량 조건에서 밀봉수 온도 변화에 따른 토출 유량의 평균값이다. 온도가 올라가도 성능이 즉각적으로 회복되지 못하는 전형적인 가스 포화 상태를 보여준다.

15°C에서 5°C로 가는 냉각 단계(Cooling Stage)에서 유량이 5.0 SCFM에서 5.22 SCFM까지 완만하게 상승한다. 이는 포화증기압 감소에 따른 정상적인 성능 향상이다. 반면에, 5°C에서 다시 10°C, 15°C로 올라가는 가열 단계(Heating Stage)에서 유량이 4.75~4.8 SCFM 수준으로 감소하여 즉각 회복되지 못한다. 이는 5°C 저온 구간에서 발생한 일부 탈기 가스가 지속적 흡입되는 5.0 SCFM의 공기와 함께 LRVP 내부에서 혼합되어 포화된 상태를 의미한다. 이 가스들은 온도가 상승하여도 배출되지 않고 임펠러 내부 체적을 계속 점유하여 냉각보다 가열 단계에서 낮은 유량으로 머물게 된다.

3.4.2 저유량 조건에서 탈기 후 성능 역전

Fig. 10은 저유량 조건에서 밀봉수 온도 변화에 따른 유량의 평균값이다. 5°C에서 탈기 현상을 통해 잔류 가스가 제거된 상태로 온도가 증가하면 성능이 일부 개선되는 역전 현상을 보여준다.

냉각 단계에서 유량이 1.67 SCFM에서 1.74 SCFM으로 증가한다. 이는 1.0 inHga 이하의 고진공에서 내부 탈기로 인한 내부 가스가 측정된 것이다. 가열 단계에서는 최종 유량은 1.84 SCFM까지 상승한다. 이는 5°C 고진공 구간의 탈기 및 배출로 인해 밀봉수가 상대적으로 청정해져 내부 가스 부하가 감소하였기 때문이다. 그래서 냉각 단계보다 유량이 더 높게 측정되는 역전 현상이 발생한다.

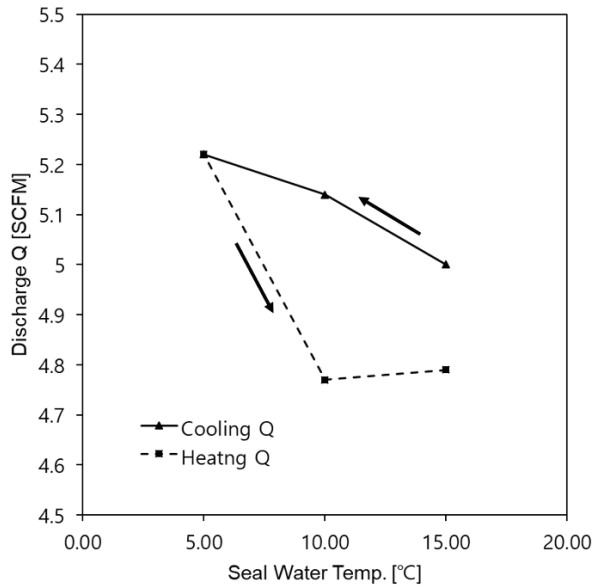


Fig. 9 Performance hysteresis of LRVP with seal water temperature(5.0 SCFM)

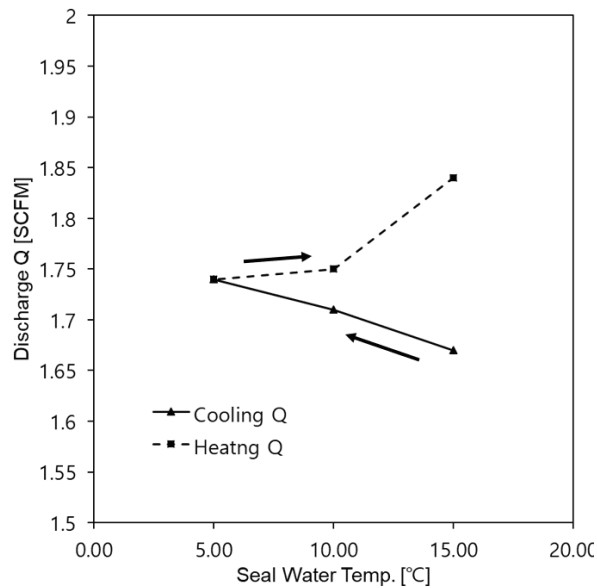


Fig. 10 Performance hysteresis of LRVP with seal water temperature(1.0 SCFM)

Table 3 LRVP 흡입성능 분석 결과 요약

항목	고유량 조건 (5.0 SCFM)	저유량 조건 (1.0 SCFM)
메커니즘	에어레이션(용해)	탈기(가스 방출)
핵심 변수	포화증기압	내부 가스 부하
5°C 구간 현상	수증기압 감소로 유량 최대치	압력 지배적 탈기로 성능 불안정 및 급변
DO 데이터 특징	DO.out 상승 (압축 시 재용해)	DO.in 상대적 높음 (흡입 시 탈기)
성능 회복 특성	하향 이력 (Negative Hysteresis)	상향 이력 (Positive Hysteresis)

Table 3은 이력현상을 포함한 고유량 조건과 저유량 조건에서의 LRVP의 특성을 요약한 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 수봉식 진공펌프(LRVP)의 저온 및 고진공 영역(1.0 inHga 이하)에서 발생하는 성능 변화 메커니즘을 실험적으로 규명하였다. 실측 데이터 분석을 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, LRVP의 고진공 성능은 펌프 내부의 에어레이션(Aeration)과 탈기(Degassing)의 상관관계에 의해 결정된다. 흡입 용량이 충분한 조건(5.0 SCFM)에서는 압축 시 발생하는 내부 에어레이션이 지배적이나, 극저유량 및 고진공 조건(1.0 SCFM, 1.0 inHga 이하)에서는 흡입 시 발생하는 압력 지배적 탈기 현상이 성능을 결정짓는 핵심 요인임을 확인하였다. 이는 DO(용존산소) 수치의 역전 현상을 통해 실험적으로 입증되었다.

둘째, 저온 구간 운전 이력에 따른 비가역적 성능 변화(Hysteresis)를 확인하였다. 고유량 조건에서는 저온 구간에서 형성된 내부 가스 부하(Internal Gas Load)가 온도가 상승하더라도 배출되지 않고 잔류하여 성능 저하 상태가 지속되는 하향 이력을 보였다. 반면, 저유량 조건에서는 저온 및 고진공 구간에서 발생한 압력 지배적 탈기 현상이 밀봉수 내 잔류 가스를 제거하는 세정 효과를 유도하여, 온도 상승 시 일시적으로 성능이 개선되는 상향 이력이 관찰되었다.

셋째, 본 연구 결과인 비가역적 성능 변화는 실제 산업 현장의 설계 사양을 물리적으로 재해석할 수 있는 근거를 제시한다. 실험 결과, 고유량 조건에서 발생한 성능 고착 현상은 자연적인 온도 복원으로는 성능 회복이 어렵다는 점을 시사한다. 이는 고진공 조건 운전에서 발생하는 내부 가스 부하 해소를 위해 추가 조치의 필요성을 보여준다. 비록 본 실험에서는 보충수(Make-up Water) 주입 효과를 직접 검증하지는 않았으나, 저유량 조건에서 확인된 가스 제거 후 성능 개선 결과는 용존 가스가 적은 보충수 주입이 LRVP의 흡입 성능을 회복시키는 유효한 방안이 될 수 있다는 공학적 해석 및 가능성을 제시한다. 이는 기존 설계 사양에 포함된 보충수의 역할이 단순 수위 유지를 넘어, 내부 가스 부하의 능동적 관리라는 실무적 가치를 가질 수 있음을 시사하며, 향후 이를 실증하기 위한 추가적인 연구의 필요성을 확인하였다.

References

- (1) Kim, H., 2026, "Research Trends in Pumps and Hydraulic Turbines in 2025," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 29, No. 2, pp. 168~174.
- (2) Ko, G. C., Suh, S. H., Yoo, S. S., Sung, S. K., 1996,

- “Effects of Number of Vanes and Vane Angles on the Performance of Water Ring Vacuum Pump,” Proceedings of KSME Autumn Conference, pp. 43~48.
- (3) Kim, S. H., Lee, S. G., Moon, Y. B., Roh, Y. J., Ahn, S. H., 2022, “An Experimental Study on the Vacuum Performance of a Liquid Ring Vacuum Pump according to the Concentration of Potassium Formate Solution,” Journal of Power System Engineering, Vol. 26, No. 4, pp. 32~40.
- (4) Bannwarth, H., 2006, “Liquid Ring Vacuum Pumps, Compressors and Systems: Conventional and Hermetic Design,” John Wiley & Sons. New York.
- (5) Atkins, P., de Paula, J., and Keeler, J., 2018, Atkins’s Physical Chemistry, 11th ed., Oxford University Press, Oxford, UK.