

이젝터-펌프 온도차발전시스템의 작동유체별 성능분석

Performance Analysis of Ejector-Pump Thermal Energy Conversion System Using Various Working Fluids

윤정인* · 설성훈*† · 손창효* · 최광환* · 김영복**

이호생*** · 김현주*** · 문정현***

Jung-In Yoon*, Sung-Hoon Seol*†, Chang-Hyo Son*,
 Kwang-Hwan Choi*, Young-Bok Kim**, Ho-Saeng Lee***,
 Hyeon-Ju Kim*** and Jung-Hyun Moon***

(Received 20 October 2016, Revision received 09 December 2016, Accepted 09 December 2016)

Abstract: This research dealt with performance characteristics of OTEC system applying an ejector and additional pump. Each system using five kinds of working fluids was analyzed, and primary parameters with respect to entrainment ratio were examined: Turbine gross power, evaporation capacity, pump work, efficiency and volume flow ratio. The primary results were as following. The efficiency of ejector-pump OTEC system was dependent on entrainment of the ejector. The degree of efficiency change was different from applied working fluid, and amount of pump work was turned out to be primary factor affected system efficiency. Meanwhile, optimized entrainment ratio was different from applied working fluid since their different vapor density. System efficiency at optimized entrainment ratio of each working fluid was around 5%, showing minor difference each other.

Key Words : Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC), Ejector, Entrainment ratio, Volume flow ratio

— 기 호 설 명 —

| | | | |
|-------------|------|-----------|---------------------|
| | m | : 질량유량 | [kg/h] |
| | h | : 엔탈피 | [kJ/kg] |
| Q : 열량 | [kW] | V : 체적유량 | [m ³ /h] |
| W : 동력, 발전량 | [kW] | η : 시스템효율 | [%] |

*† 설성훈 : 부경대학교 대학원 냉동공조공학과
 E-mail : seolsh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180
 *윤정인, 손창효, 최광환 : 부경대학교 냉동공조공학과
 **김영복 : 부경대학교 기계시스템공학과
 ***이호생, 문정현, 김현주 : 선박해양플랜트연구소 해수 플랜트연구센터

*† Sung-Hoon Seol : Department of Refrigeration and Air-conditioning, Pukyong National University.
 E-mail : seolsh@puyong.ac.kr, Tel : 051-629-6180
 *Jung-In Yoon, Chang-Hyo Son, Kwang-Hwan Choi : Pukyong National University, Refrigeration and Air-conditioning Engineering Department.
 **Young-Bok Kim : Pukyong National University, Mechanical System Engineering Department.
 ***Ho-Saeng Lee, Hyeon-Ju Kim, Jung-Hyun Moon : Korea Research Institute of Ships&Ocean Engineering, Seawater Utilization Plant Research Center.

ω : 질량유량비 [-]
 ϕ : 체적유량비 [-]

양온도차발전 시스템 대비 약 16%의 시스템효율 향상을 확인하였다.

이상의 종래연구를 살펴보면 이젝터를 적용한 해양온도차발전 시스템의 효율은 이젝터의 성능에 크게 영향을 받으며, 작동유체의 물성치에 따라 이젝터의 성능은 크게 변화한다. 따라서, 본 연구에서는 5종의 작동유체를 적용한 이젝터-펌프 온도차발전시스템의 성능을 비교하였으며, 시스템에 적절한 작동유체의 선정과 이젝터 유량비의 범위에 대한 최적화 연구를 수행하였다.

하첨자

t : 터빈
 p : 펌프
 e : 증발기
 1-7 : 상태점

1. 서 론

지구 환경적 측면에서 신재생 에너지 공급원에 대한 관심이 집중되어 있다. 해양에너지는 세계적으로 주목받는 에너지원으로서 다양하게 활용되고 있다. 이 중 해양의 표층수와 심층수의 온도차를 이용하는 해양온도차발전 시스템(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)은 친환경적이며 열원이 존재하는 한 무한히 가동 가능하다는 장점이 있다. 하지만 이러한 장점에도 불구하고 해양온도차발전 시스템의 낮은 시스템효율은 이것의 상용화를 방해하고 있는 실정이다.

본 연구에서 다루는 시스템은 해양온도차발전 시스템의 효율 향상을 위하여 액-증기 이젝터(Liquid-vapor ejector)를 적용하였으며, 이젝터의 가동을 위한 작동부펌프(Motive pump)를 설치하였다. 이젝터를 적용한 온도차발전 시스템의 종래연구는 다음과 같다.

Li 등¹⁾은 물과 암모니아 혼합냉매를 사용하는 Kalina 사이클에 액-증기 이젝터를 적용하여 약 5.5%의 시스템효율의 개선을 확인하였다. 또한, 증기-증기 이젝터를 적용한 EORC(Organic Rankine Cycle with Ejector)를 제안하여 실험적 연구를 수행하였다. 하지만 이젝터 구동유체의 기화에 소모되는 보조증발열량의 투입으로 인해 시스템효율의 증가는 확인할 수 없었다.²⁾

Yoon 등³⁾은 R32/R152a 혼합냉매를 이용한 액-증기 이젝터 적용 해양온도차발전시스템을 제안하고 시뮬레이션 분석을 실시하였다. HYSYS 프로그램을 이용한 시뮬레이션 분석 결과 기본 해

2. 해양온도차발전 시스템(OTEC)

2.1 기본 해양온도차발전 시스템

Fig. 1은 기본 해양온도차발전 시스템의 개략도를 나타내며, Fig. 2는 압력-엔탈피 선도(P-h diagram)를 나타낸다.⁴⁾ 증발기를 지나는 액 상태의 작동유체는 약 25~29℃ 수준의 해양의 표층수와 열교환을 통해 기체상태로 변화한다. 고압의 기체 상태의 작동유체는 터빈을 구동하고, 응축기로 유입되어 약 5℃의 해양 심층수와 열교환하여 응축된다.

2.2 이젝터-펌프 적용 해양온도차발전 시스템

Fig. 3은 이젝터-펌프 적용 해양온도차발전 시스템의 개략도를, 그리고, Fig. 4는 해당 사이클의 압력-엔탈피 선도(P-h선도)를 나타낸다.⁴⁾

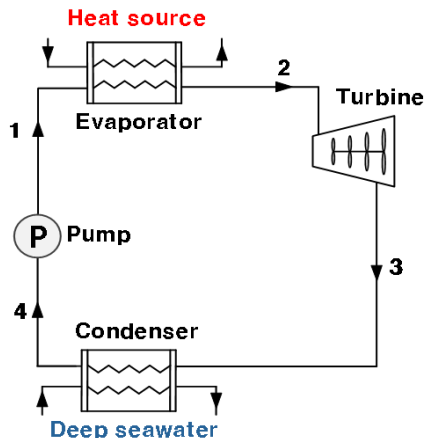


Fig. 1 Schematics of basic OTEC⁴⁾

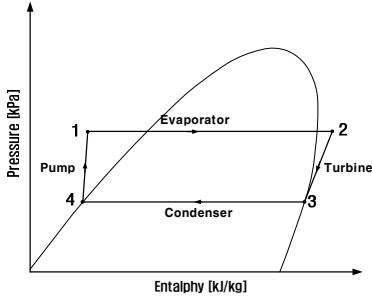


Fig. 2 P-h diagram of basic OTEC⁴⁾

응축기 출구에서 분배기를 통해 일부의 작동유체는 증발기에서 고열원인 해양의 표층수와 열교환하여 고압의 기체상태가 된다. 한편, 분배기에서 나누어진 나머지 작동유체는 상변화 및 현열교환을 거치지 않고 이젝터 작동부 전단에 설치된 펌프에 의해 이젝터의 작동부 유체로 사용된다. 이젝터 내부에서 분사된 작동부 유체와 유인된 흡입부 유체는 혼합되어 응축압력으로 배출되며, 응축기에서 해양의 저열원인 심층수와 열교환을 하여 응축한다.

3. 분석조건 및 계산식

3.1 시뮬레이션 분석조건

Table 1은 2.2절의 이젝터-펌프 적용 해양온도차발전 시스템의 성능분석 조건을 나타낸다. 시뮬레이션의 변수인 작동유체는 R32, R134a, R152a, R507 그리고 R717의 5종을 선택하였다.

사이클 분석에는 ASPEN HYSYS를 사용하였다.⁵⁾

3.2 계산식

본 연구에서 냉매의 종류와 이젝터의 질량 유량비(ω)에 따른 터빈전력생산량(W_t), 펌프동력(W_p), 시스템효율(η) 그리고 체적 유량비(ϕ)를 분석하였으며, 각각은 다음의 계산식 (1)~(5)를 사용하였다.

$$\omega = \frac{m_3}{m_7} \quad (1)$$

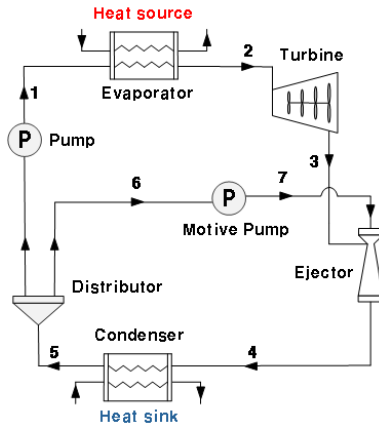


Fig. 3 Schematics of ejector-pump OTEC⁴⁾

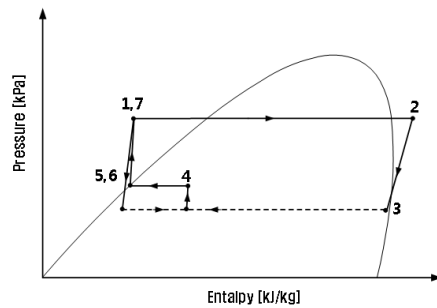


Fig. 4 P-h diagram of ejector-pump OTEC⁴⁾

Table 1 Analysis conditions

| Parameters | Value |
|--|-------|
| Surface seawater inlet temperature [°C] | 29 |
| Deep seawater inlet temperature [°C] | 5 |
| Temperature difference of deep seawater inlet and outlet [°C] | 5.8 |
| Temperature difference of surface seawater inlet and outlet [°C] | 3 |
| Pump efficiency [%] | 65 |
| Turbine efficiency [%] | 80 |
| Pressure ratio of motive and discharge of ejector [-] | 3.0 |
| Pressure drop at heat exchangers [kPa] | 10 |

$$W_t = m_2(h_2 - h_3) \quad (2)$$

$$W_p = m_1(h_1 - h_5) + m_6(h_7 - h_6) \quad (3)$$

$$Q_e = m_1(h_2 - h_1) \quad (4)$$

$$\eta = \frac{W_t - W_p}{Q_e} \times 100 \quad (5)$$

4. 분석결과 및 고찰

Fig. 5는 이젝터-펌프 적용 해양온도차발전 시스템에 적용된 이젝터의 질량 유량비에 따른 터빈전력생산량을 나타낸다. 이젝터의 작동부 유체의 질량 유량을 일정하게 유지하였을 때, R32, R134a, R152a, R717 그리고 R507 적용 시스템에서 공통적으로 이젝터의 질량 유량비가 증가함에 따라 터빈에서의 전력생산량이 증가하는 경향을 보였다. 이는 유량비가 증가함에 따라 터빈을 통과하는 작동유체의 질량유량이 증가하였기 때문이다. 작동유체 간 비교에서는 R717이 가장 높은 값을 보였으며, 나머지 작동유체 적용 시 비교적 유사한 발전량을 나타냈다.

하지만, Fig. 6에 나타난 바와 같이 증발열량 또한 R717이 가장 높음을 확인할 수 있다. 이젝터의 질량 유량비에 따른 증발열량과 터빈전력생산량의 변화 경향은 서로 유사하게 나타났다. 적용된 작동유체간 증발열량 비교에서도 R717을 제외한 나머지 4종의 작동유체에서는 비교적 작은 차이를 보이며 유사하게 나타났다.

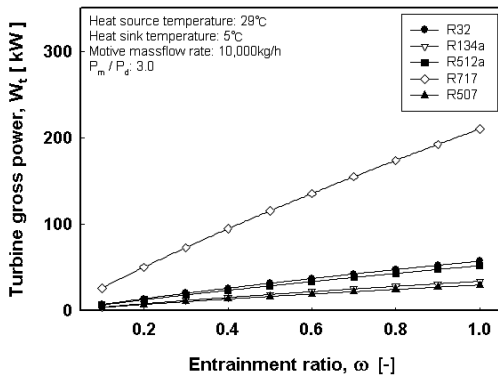


Fig. 5 Turbine gross power with respect to entrainment ratio

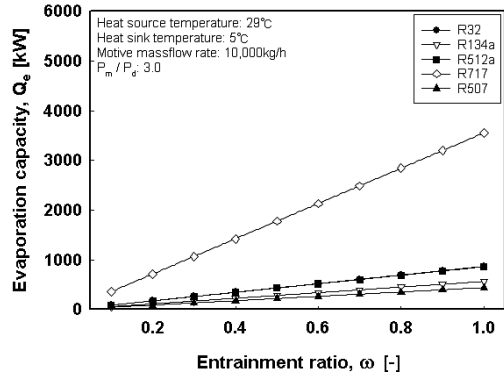


Fig. 6 Evaporation capacity with regard to entrainment ratio

한편, 작동유체간 펌프동력을 비교한 결과는 Fig. 7과 같이 나타난다. 이젝터의 작동부 유체의 질량유량이 일정하다는 것은 이젝터의 전단에 설치된 작동부 펌프(Motive pump)의 유량이 일정하다는 것을 의미한다. 따라서 식 (3)에 따라 펌프 양정에 따른 엔탈피 차이에 의해 동력이 변화함을 알 수 있다. 적용된 작동유체 별 펌프동력 비교 결과 R32, R717, R507, R152a 그리고 R134a 순으로 나타났다. 이는 분석조건에서 이젝터의 작동압력과 토출압력의 비율 P_m/P_d 를 3.0으로 설정하였기 때문에 토출압력인 응축압력이 높은 유체일수록 큰 펌프동력이 소요되는 것으로 분석된다.

Fig. 8은 작동유체 종류 별 이젝터의 질량 유량비에 따른 시스템효율을 나타낸다. 작동유체마다 변화량은 다르나 공통적으로 일정 질량 유량비

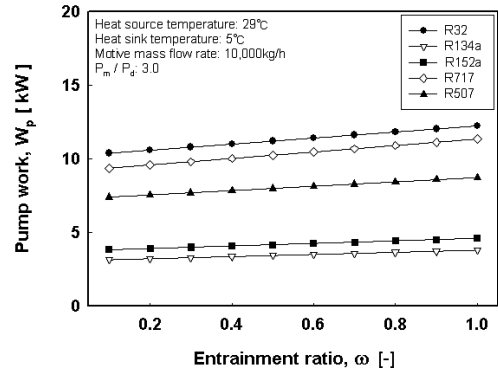


Fig. 7 Pump work with respect to entrainment ratio

이하의 구간에서 시스템효율이 감소하는 경향을 보였다. 특히 R32, R507 작동유체의 경우 효율이 마이너스 값으로 나타나며 시스템효율이 이젝터의 질량 유량비에 크게 영향을 미침을 확인하였다. R32, R507 그리고 R717 작동유체의 경우 응축압력이 높은 유체로서 Fig. 7에 나타난 바와 같이 높은 펌프동력이 소요된다. 이젝터의 질량 유량비가 감소할수록 터빈전력생산량과 펌프동력의 차이가 감소하게 되며, R32와 R507 작동유체의 경우 유량비 0.2 이하의 구간에서는 펌프에서 소모되는 동력이 터빈에서 생산하는 전력량보다 커지기 때문에 시스템효율이 마이너스로 나타난다. 반면, R717 작동유체는 비교적 높은 응축압력으로 인해 펌프 소요동력이 큰 유체임에도 불구하고 터빈에서 생산하는 전력량이 펌프 소요동력 대비 높은 비중을 차지하여 이젝터의 유량비가 감소함

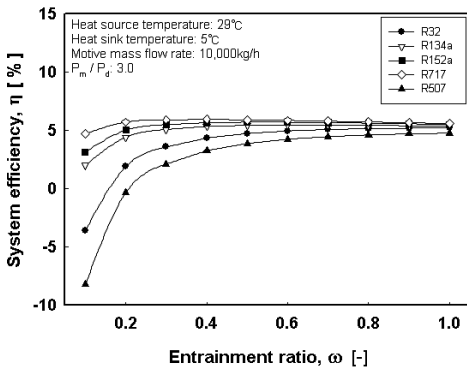


Fig. 8 System efficiency with regard to entrainment ratio

Table 2 Liquid and vapor density of various working fluids ⁶⁾

| Working fluid | Density | |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|
| | Liquid [kg/m ³] | Vapor [kg/m ³] |
| R32 | 1020.2 | 30.09 |
| R134a | 1261.5 | 20.12 |
| R152a | 936.4 | 11.60 |
| R717 | 624.85 | 4.84 |
| R507 | 1089.0 | 43.80 |

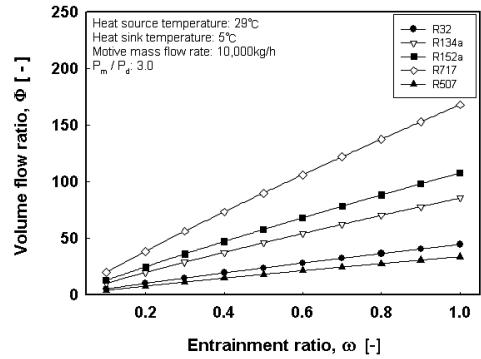


Fig. 9 Volume flow ratio with regard to entrainment ratio

에 따라 시스템효율이 크게 영향을 받지 않는 것으로 분석된다.

Fig. 9는 작동유체 별 이젝터의 질량 유량비에 따른 체적 유량비를 나타낸다. 질량 유량비가 증가함에 따라 흡입되는 유체의 질량 유량이 증가하기 때문에 체적 유량 또한 증가함을 확인할 수 있다. 이젝터의 체적 유량비는 이젝터의 성능과 밀접하게 연관되어 있는 지표로써 현실적인 질량 유량비를 선정하는 지표가 된다. Table 2에 나타난 바와 같이 작동유체 별 기체의 밀도는 큰 차이를 보이며, 이로 인해 동일한 질량 유량비에서 서로 다른 체적 유량비를 보인다.

한편, R134a를 적용한 Lawrence^{7,8)}의 실험적인 연구에 따르면 체적 유량비 약 50 이하에서 이젝터의 성능이 확인되었다. 종래연구와 Fig. 9를 종합하면 작동유체마다 이젝터의 성능을 확인할 수 있는 질량 유량비가 상이하여 서로 다른 최적의 질량 유량비를 가는 것으로 분석되며, Fig. 10과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 10은 이젝터의 체적 유량비 30을 기준으로 하였을 때 각 작동유체를 적용한 시스템의 효율과 질량 유량비를 나타낸다. R152a와 R717 적용 시 최대 효율인 5.26%, R507 적용 시 최저 효율인 4.7%를 나타내며 약 12%의 차이를 보였다. Table 4에 나타난 바와 같이 각 작동유체 별 기체의 밀도는 최대 9배의 차이를 보이기 때문에 동일 체적 유량비 조건에서 서로 다른 질량 유량비를 나타

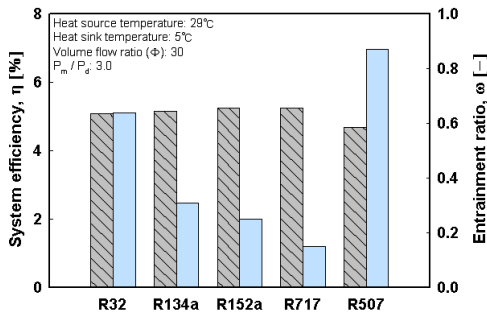


Fig. 10 System efficiency and entrainment ratio comparison of system using various working fluids

낸다. 기체의 밀도가 가장 큰 R507 유체는 체적 유량비 30 조건에서 0.87의 질량 유량비를 나타냈고, 기체의 밀도가 가장 작은 작동유체인 R717은 동일 조건에서 0.15의 질량 유량비를 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 5종의 작동유체를 사용하는 이젝터-펌프 적용 해양온도차 발전시스템의 성능분석을 실시하였으며, 이에 대한 주요 결과는 다음과 같다.

1) 작동유체 별 펌프 소모동력은 최대 3배 이상의 차이를 보이며 유체의 종류에 따라 크게 변화함을 확인하였다.

2) 이젝터-펌프 적용 해양온도차 발전시스템의 효율은 이젝터의 질량 유량비에 따라 변화한다. 변화 정도는 유체마다 다르며, 이는 소요 펌프 동력 크기의 차이가 원인으로 분석된다. R32와 R507과 같이 소요 펌프 동력이 큰 유체는 일부 질량 유량비 구간에서 효율이 마이너스로 나타났다.

3) 이젝터의 성능확보를 위한 체적 유량비 고려시, 각 작동유체 별 기체 밀도차에 의해 서로 다른 질량 유량비를 보인다.

4) 최적 질량 유량비 조건에서 각 작동유체를 적용한 시스템의 효율은 약 5% 내외의 대체로 유사한 값을 보였다.

후 기

본 연구결과는 선박해양플랜트연구소가 지원한 “해수-미활용열 이용 온도차발전 및 담수화 기초성능평가 기반구축” 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

References

1. X. Li, Q. Zhang and X. Li, 2013, "A Kalina cycle with ejector", Energy, Vol. 54, pp. 212-219.
2. X. Li, H. Huang and W. Zhao, 2014, "A supercritical or transcritical Rankine cycle with ejector using low-grade heat", Energy Conversion and Management, Vol. 78, pp. 551-558.
3. J. I. Yoon, C. H. Son, S. H. Seol, H. U. Kim, S. J. Ha, S. H. Jung, H. J. Kim and H. S. Lee, 2015, "Performance analysis of OTEC power cycle with a liquid vapor ejector using R32/R152a", Heat and Mass Transfer, Vol. 15, No. 11, pp. 1597-1605.
4. J. I. Yoon, S. H. Seol, C. H. Son, S. H. Jung, Y. B. Kim, H. S. Lee, H. J. Kim and J. H. Moon, "Analysis of the high-efficiency EP-OTEC cycle using R152a", Renewable Energy, In press.
5. Aspen HYSYS, Version 8.0, Aspen Technology Inc, 2013.
6. REFPROP, NIST Reference Fluid Properties
7. N. Lawrence, 2012, "Analytical and experimental investigation of two-phase ejector cycles using low-pressure refrigerants", Urbana Illinois (Master's thesis).
8. N. Lawrence and S. Elbel, 2013, "Theoretical and practical comparison of two-phase ejector refrigeration cycles including First and Second Law analysis", International Journal of Refrigeration, Vol. 36, No. 4, pp. 1220-1232.