



이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클의 실험적 연구 Experimental Study of OTEC Cycle using Ejector-Pump

문정현* · 이호생**† · 김현주***

Ho-Saeng Lee*, Jung-Hyun Moon**† and Hyeon-Ju Kim***

(Received 22 November 2019, Revision received 03 December 2019, Accepted 03 December 2019)

Abstract: Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) is suitable for application in tropical and equatorial regions. However, it is difficult to apply it in the area where the surface water temperature fluctuates according to the seasons. Therefore, a thermal energy conversion system which uses unused heat as a heat source is being studied instead of surface seawater. In this study, the experiment was conducted by fabricating the experimental device for the thermal energy conversion using the unused heat and the ejector-motive pump. When the high pressure fluid is injected into the motive part of the ejector, a low pressure is formed in the suction part with an increase in the amount of the power generation from the turbine and improvement in the cycle efficiency. The pressure recovery rate of the ejector and the cycle output efficiency were confirmed by increasing the flow rate at the motive part and the output efficiency was 9.5% at the flow ratio of 1:20 between the suction part and the motive part.

Key Words : OTEC, Unused heat, Ejector

— 기 호 설 명 —

Q : 열량 [kW]
 W : 발전량 [kW]
 T : 온도 [°C]
 h : 엔탈피 [kcal/kg]
 m : 질량 유량 [kg/s]
 c : 비열 [J/kg·K]

그리스 문자

ω : 이젝터 유량비 [-]
 η : 시스템 효율 [%]

하첨자

exp : 팽창밸브

**† 이호생(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3042-5889) : 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터
 E-mail : hslee@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5021
 *문정현(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5247-1029) : 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터
 ***김현주(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4986-8914) : 선박해양플랜트연구소 해양플랜트-에너지연구부

**† Ho-Saeng Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3042-5889) : Seawater Energy Plant Research Center/Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering.
 E-mail : hslee@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5021
 *Jung-Hyun Moon(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5247-1029) : Seawater Energy Plant Research Center/Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering.
 ***Hyeon-Ju Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-4986-8914) : Offshore Plant and Marine Energy Research Division/Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering.

i : 입구
o : 출구
e, Eva : 증발기
t : 터빈
p : 압력
motive : 이젝터 모티브
suction : 이젝터 흡입
discharge : 이젝터 토출

1. 서 론

해수온도차발전(OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion)은 태양 열에너지를 흡수한 표층수 온도와 태양 열에너지가 닿지 않아 연중 낮은 온도를 유지하고 있는 심층수의 온도 차이를 이용한 전력 발전 기술이다. 해수온도차발전은 해수를 이용한 친환경 발전이며, 표층수의 온도가 연중 일정한 투발루, 인도네시아, 말레이시아, 키리바시 등 적도, 열대 지방에서는 낮과 밤, 계절에 상관없이 발전이 가능하다.¹⁾ 또한 전력 발생 이외에 수산양식, 담수화 등 취수된 해수를 통한 추가적인 활용이 가능한 장점이 있다.²⁾ 하지만 계절에 따라 표층수온이 변동되는 지역에서는 표층수와 심층수를 이용한 해수온도차 발전을 적용하기 어렵다. 따라서 표층수 대신 미활용열을 이용한 온도차 발전 시스템에 대한 연구가 일본, 미국을 비롯한 여러 나라에서 진행 중이다. 미활용열을 이용한 온도차 발전은 표층수를 적용하기 힘든 지역의 지역적 한계를 극복할 수 있으며 작은 온도 차이를 이용하는 해수온도차 발전의 한계를 극복할 수 있다. 지열, 공장폐열, 선박폐열, 발전소 온배수 등 다양한 열원을 해수온도차 발전의 열원으로 적용할 수 있다.

종래 연구에서는 다양한 폐열원을 이용한 발전 사이클의 에너지 회수 및 시스템 효율 향상에 관한 연구가 진행되어 왔다.

Bertrand F. et al.³⁾은 폐열원의 온도 레벨 및 폐열원 출처를 정리하였으며, 다양한 에너지를 회수할 수 있는 열교환기에 대하여 정리하였다. 또한 회수한 열원으로부터 전력 생산을 위해 증기 랭

킨사이클, 유기랭킨사이클, 칼리나사이클, 오스와미 사이클, 초임계 사이클 등 발전 사이클을 정리하고 열원 온도별 에너지 회수 기술의 추천 및 그 장점에 대해 분석하였다. 또한 폐열을 활용하여 가동 중인 발전설비의 열원별, 규모별 정리 및 열원 온도에 따른 작동유체를 정리하였다. 예를 들어, 용접 및 사출 성형기계에서 발생하는 폐열의 온도는 32-88℃이며 이때 칼리나 사이클을 통한 열 회수를 추천하였다.

Steven Lecompte et al.⁴⁾은 미활용열을 이용한 유기랭킨사이클의 최적화를 위해 열원 유형, 작동유체 종류, 부품소재 구성, 제어전략, 구성요소 레이아웃 및 크기 조정의 주요 포인트에 대하여 연구를 수행하였다. 미활용열의 회수 및 발전을 위해 ORC 사이클에 초임계 사이클, 삼중 사이클, 혼합냉매 적용, 다중 증발압력, 유기 플래시 사이클, 재생기, 증기 인젝터, 캐스케이드 사이클, 재열기를 적용하여 각 사이클 별 T-s 선도를 분석하였다.

Mathew Aneke et al.⁵⁾은 알래스카 Chena 지역의 약 73℃ 지열원을 이용하여 250 kW급 ORC 지열발전플랜트를 연구하였으며, R134a를 작동유체로 한 해당 연구에서 Net power 210 kW 및 사이클 효율 8%를 달성하였다.

Lee et al.⁶⁾은 미활용열을 이용한 200 kW급 고온도차발전 플랜트를 만들어 실증하였다. R245fa를 작동유체로, 80℃의 열원 및 5℃의 열침을 사용하여 Gross power 200 kW 및 약 7.8%의 효율을 달성하였다.

한편 미활용 열원을 사용한 온도차발전 사이클의 효율 상승을 위해 이젝터를 적용한 종래연구도 진행되어 왔다.

Yoon et al.⁷⁾은 이젝터-펌프를 적용한 해수온도차발전 사이클에서 작동유체에 따른 사이클 성능 분석 및 이젝터의 작동부와 흡입부로 유입되는 유량비에 따른 성능 분석을 실시하였다. 이젝터의 유량비가 증가하였을 때 터빈 발전량과 증발열량이 증가하였으며, 시스템 효율은 0.2-0.3 구간의 유량비에서 가장 큰 값을 나타내었다.

본 연구에서는 75℃의 미활용 열원을 적용한

이젝터-펌프 온도차발전사이클 실험장치를 작동부와 흡입부의 작동유체 유량비에 따른 성능 분석 및 효율분석을 실시하였다.

2. 이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클

2.1 OTEC 사이클

Fig. 1은 기본 OTEC 사이클의 개략도이다. OTEC 사이클은 증발기, 터빈, 응축기, 순환펌프로 구성되어 있으며, 증발기에서 작동유체는 열원(해수, 미활용열 등)과 열교환하여 기체상태가 되어 터빈을 구동한 뒤 응축기로 유입된다. 응축기에서 기체상태의 작동유체는 심층수와 열교환하여 액체 상태로 응축되며, 순환펌프로 유입되어 사이클을 구성한다.

2.2 이젝터

Fig. 2는 이젝터의 각 부분의 명칭 및 원리를 나타낸 개략도이다. 이젝터는 크게 작동부(Motive), 흡입부(Suction), 토출부(Discharge)로 이루어져 있다.

이젝터의 작동부로 유입된 작동유체는 노즐을 지나며 단열팽창하여 작동유체의 고압 에너지는 고속의 속도에너지로 변환된다. 이 속도에너지에 의해 흡입부에 저압이 형성되며, 이로 인해 흡입부 입구측 작동유체는 이젝터 내부로 유입된다. 이젝터의 디퓨저 부분을 지나며 작동부와 흡입부 유체는 혼합되며 흡입부보다 높은 압력으로 압력

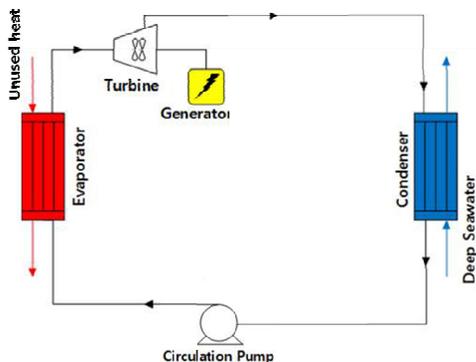


Fig. 1 Schematic of basic OTEC system

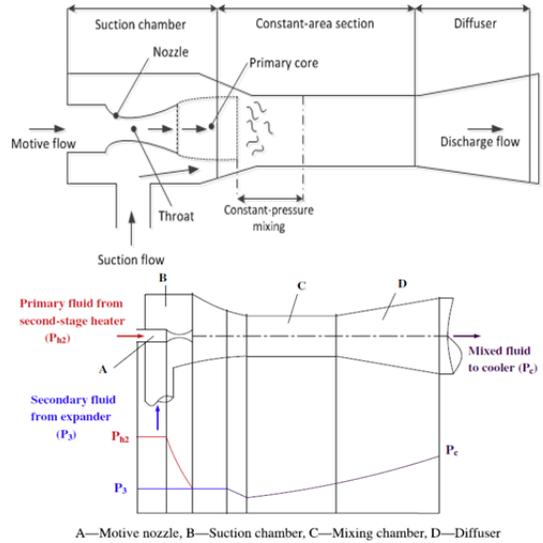


Fig. 2 Schematic diagram and principle of ejector

이 회복되어 토출된다. 이젝터의 토출부에서 작동유체가 흡입부보다 높은 압력으로 토출되기 위해서는 작동부에서 일정 이상의 압력과 유량이 필요하며 해당 조건에 만족되기 이전에는 발전사이클에서 이젝터의 사용에 의한 이득을 볼 수 없다.

2.3 이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클

Fig. 3은 이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클의 개략도이다. 이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클은 기본 OTEC 사이클에 이젝터, 분배기, 작동부 펌프가 추가되었다.

응축기를 지나며 응축된 작동유체는 분배기에서 분지된다. 분지된 일부의 작동 유체는 순환펌프(Circulation pump)를 통해 증발기를 통과하며 열원과 열교환하여 고온-고압의 기체상태가 되어 터빈을 구동하여 전력을 생산한다. 터빈을 통과한 기체 상태의 작동유체는 이젝터의 흡입부로 흡입된다. 분지된 나머지 작동유체는 작동부 펌프(Motive pump)를 지나며 가압되어 이젝터의 작동부로 유입된다. 작동부 펌프로 유입 될 때의 작동유체 압력에 따라 시스템의 성능이 달라지는데, 작동유체가 작동부 펌프를 통해 더 높은 압력으로 작동부로 유입되면, 노즐을 통해 더 큰 속도 에너지로 변환되며 이를 통해 흡입부에서는 더

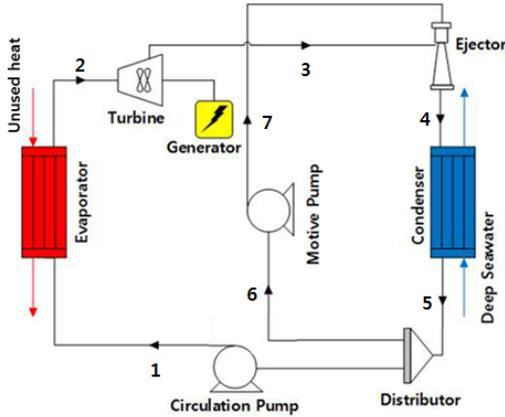


Fig. 3 Schematic diagram of EP-OTEC cycle

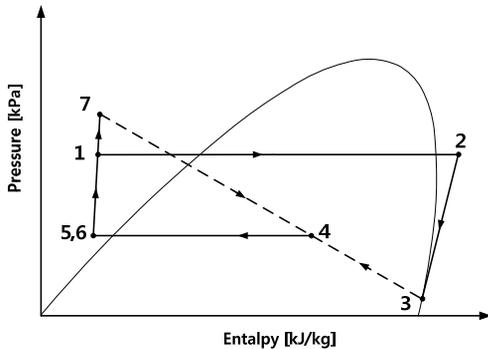


Fig. 4 P-h diagram of EP-OTEC cycle

낮은 압력이 형성된다. 결과적으로 터빈에서 더 많은 전력을 생산할 수 있게 되며, 작동부 및 흡입부를 통해 이젝터로 유입된 유체는 내부에서 혼합되어 응축기로 유입되며 사이클을 구성한다.

Fig. 4는 이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클의 P-h 선도이다. 응축기를 통과하고 분배기를 지난 (5)상태의 작동유체는 작동부 펌프를 지나며 (7)의 상태로 가압되어 이젝터의 작동부로 유입된다. 분배기를 지난 나머지 작동유체는 순환펌프를 지나며 (1)의 상태로 증발기에 유입되어 (2)의 과열증기 상태가 되어 터빈으로 유입된다. 터빈을 가동한 작동유체는 이젝터의 흡입부로 유입되는데, 이젝터 작동부의 유체(7)는 노즐을 통과하며 흡입부에 저압상태를 유발하여 유체를 견인하게 되고, 이로 인해 흡입부는 기본 OTEC 사이클의 응축압력보다 낮은 (3)의 압력으로 이젝터로 흡입된다.

따라서 기본 OTEC 사이클보다 엔탈피 측면에서 이득을 취하게 되며 이는 발전량 증가로 이어진다. 이젝터 내부에서 혼합된 작동부 유체와 흡입부 유체는 압력이 회복되어 (4)의 상태로 응축기에 유입되고, 열침과 열교환하여 응축되어 사이클을 형성한다.

3. 실험장치 및 실험조건

3.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용된 실험 장치를 Fig. 5에 나타내었다. 실험 장치는 증발기, 응축기, 이젝터, 순환펌프, 작동부 펌프, 수액기 및 팽창밸브로 구성하였다. 본 실험 장치는 터빈의 압력강하 모사를 위해 증발기 후단에 팽창밸브를 설치하였다. 각 부분에서 작동유체의 상태를 파악하기 위해 각 장비 전·후단에 온도센서 및 압력 센서를 설치하였다. 특히 이젝터의 작동부, 흡입부, 토출부에서의 온도, 압력 상태를 파악하며 흡입부 대비 토출부압력인 압력회복률을 알고자 하였다. 순환펌프 및 작동부 펌프의 토출부에 각각 유량계를 설치하여 이젝터의 작동부 및 흡입부로 얼마만큼의

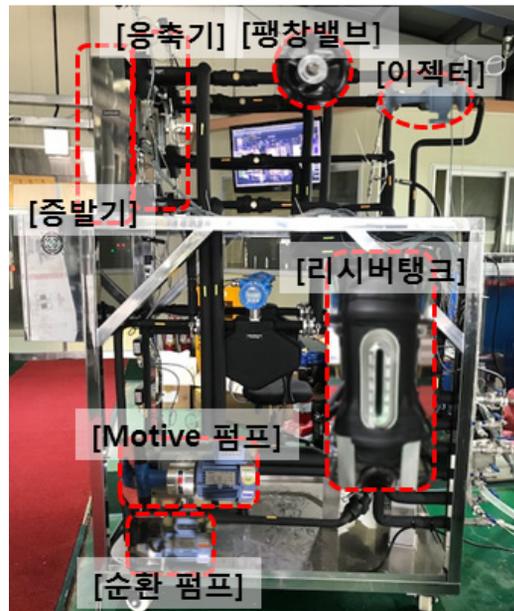


Fig. 5 Experimental device

Table 1 Test conditions

Variable	Value	Unit
Working Fluid	R245fa	-
Inlet temperature of heat source	75	°C
Inlet temperature of heat sink	5	°C
Mass flow rate ratio(Suction : Motive)	1:2 - 1:20	-
Pressure difference of motive pump	200 - 470	kPa

유량이 흡입되는지 파악하였다. 작동유체는 순환 펌프 및 작동부 펌프를 통해 수액기에서 토출되는데, 각 펌프로의 작동유체 토출로 인한 유량의 간섭을 막기 위해 수액기 아래쪽에 두 개의 토출관을 설치하여 각각 순환펌프 및 작동부 펌프로 작동유체가 토출된다.

Table 1은 이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클 실험 장치의 실험 조건이다. 작동유체로는 R245fa가 사용되었으며, 공장폐열, 선박폐열 등 미활용 열을 가정하여 열원의 온도는 75°C로 하였다. 열침의 온도는 심층수의 온도인 5°C로 가정하였다. 본 연구에서는 이젝터의 작동부 유량을 순차적으로 늘려가며 실험을 수행하였으며, 흡입부와 작동부의 유량비를 1:2부터 1:20까지 변경시키며 실험을 수행하였다. 이때 작동부 유체의 유량이 늘어나며 이젝터 작동부의 압력은 200~470 kPa까지 변화하였다.

3.2 계산식

본 연구에서는 흡입부와 작동부의 유량비(ω)에 따른 이젝터에서의 압력회복률(θ)과 이 때의 시스템 효율을 분석하였다. 실험에서는 실제 터빈-발전기를 대신하여 팽창밸브를 사용하였으므로, 밸브의 전·후단의 상태량을 바탕으로 한 엔탈피 차이로 발전량을 가정하였다. 따라서 실제 펌프 동력이 계산되지 않은 열원 대비 발전량(W_t)의 의미로 Output efficiency(η_{output})의 개념을 사용하였다. 증발열량은 증발기에서의 열원측 입구와 출구 온도 차이에 유량 및 비열을 곱하여 아래와 같이 계산되었다.

$$Q_e = m_{hot\ water} \cdot c_{p, hot\ water} \cdot \Delta T_{hot\ water} \quad (1)$$

터빈 발전량(W_t)은 팽창밸브 전·후단의 상태로 부터 엔탈피를 구하여 가정하였으며 아래와 같이 계산하였다.

$$W_t = m_s \cdot (h_{exp, i} - h_{exp, o}) \quad (2)$$

따라서 Output efficiency(η_{output})는 아래의 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\eta_{output} = \frac{W_t}{Q_e} \quad (3)$$

이젝터의 작동부 및 흡입부로 유입되는 작동유체 유량비(ω)는 아래 식 (4)와 같이 계산되었다.

$$\omega = \frac{m_{suction}}{m_{motive}} \quad (4)$$

압력회복률은 흡입부로 들어간 압력 대비 토출부에서 토출되는 압력의 비율로 아래의 식 (5)와 같이 계산되었다.

$$\theta = \frac{P_{discharge}}{P_{suction}} \quad (5)$$

4. 실험결과

4.1 압력회복률

Fig. 6은 흡입부와 작동부의 유량비에 따른 압력회복률을 나타내었다. 압력회복률이란 토출부의 압력을 흡입부의 압력으로 나눈 값으로 이젝터에 흡입된 유체가 얼마만큼 압력을 회복하여 토출되는지 나타내는 이젝터의 성능지표 중 하나이다.

이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클에서 압력회복률의 정도에 따라 터빈에서 얼마만큼의 전력을 더 생산할 수 있는지가 결정되기 때문에 압력회복률은 전력 발전량 및 효율에 직접적으로 영향을 미치는 인자이다.

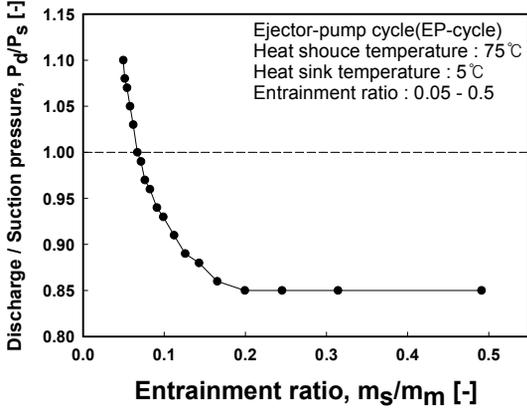


Fig. 6 Pressure recovery ratio

본 실험에서는 작동부 유량을 점차 늘려 흡입부와 작동부의 유량비를 1:2부터 1:20까지 약 20 단계에 나누어 실험을 진행하였다. 이젝터의 작동부 유량이 증가할수록 작동부에서 측정되는 압력이 상승하였으며, 이에 의해 이젝터의 흡입부에서 압력은 감소하고 토출부에서의 압력은 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

압력회복률은 흡입부와 작동부의 유량비가 1:15인 구간에서부터 그 값이 1을 나타내었으며, 유량비가 1:20인 구간에서 1.1을 나타내었다. 흡입부와 작동부의 유량비가 1:15 이하인 구간에서는 압력회복률이 1을 넘지 않아 발전량에서 이젝터 적용의 이득을 취할 수 없었다. 이는 작동부에서의 유량이 적고 압력이 작을 때, 이젝터 노즐을 지나가는 유체의 속도가 흡입부의 유체를 견인할 수 있을 만큼의 속도를 가지지 못하기 때문이다.

4.2 Output efficiency

Fig. 7은 흡입부와 작동부의 유량비에 따른 시스템의 Output efficiency를 나타낸다. 실제 터빈이 적용되지 않았기 때문에 식 (2)에 나타낸 바와 같이 팽창밸브 전·후단에서의 상태로부터 엔탈피를 구하여 증발열량으로 나눈 값을 Output efficiency로 나타내었다.

Output efficiency의 그래프는 4.1에 기술한 압력회복률 그래프와 매우 유사한데, 이는 이젝터에서의 압력회복률이 시스템 Output efficiency와 직접

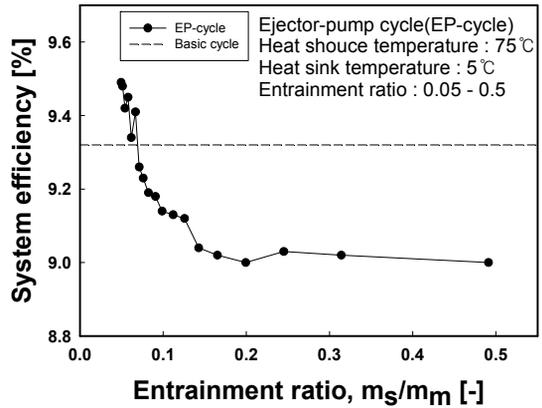


Fig. 7 Output efficiency

적으로 연관되기 때문이다. 이젝터에서의 압력회복률이 클 때 동일한 응축압력에서 팽창밸브 후단의 압력을 더 많이 떨어트릴 수 있으며, 따라서 밸브 전·후단의 엔탈피 차이를 더 크게 가지고 갈 수 있어 시스템 Output efficiency가 증대된다.

해당 실험장치의 작동부 배관을 닫고 기본 사이클로 구동 시 9.32%의 Output efficiency를 나타내었으며, 흡입부와 작동부의 유량비가 1:15 이상인, 압력회복률이 1을 넘어가는 구간부터 이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클의 Output efficiency가 기본 사이클보다 높게 나타났다. 흡입부와 작동부의 유량비가 1:20인 구간에서 Output efficiency는 약 9.5%를 나타내었다.

5. 결론

본 논문에서는 이젝터-펌프를 적용한 OTEC 실험장치를 흡입부와 작동부 유량을 변화시켜 가며 압력회복률과 Output efficiency를 분석하였다.

1) 흡입부와 작동부의 유량비가 1:15를 넘는 구간에서 압력회복률이 1을 초과하였으며, 유량비가 1:20인 구간에서 압력회복률은 1.1을 나타내었다.

2) 해당 실험장치를 기본 OTEC 사이클로 구동 시 Output efficiency는 9.32%를 나타내었으며, 흡입부와 작동부의 유량비가 1:15를 넘어가는 구간에서 이젝터-펌프를 적용한 OTEC 사이클이 기본 OTEC 사이클의 Output efficiency를 넘어섰다. 유

량비가 1:20인 구간에서 Output efficiency는 9.5%를 나타내었다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 국가 R&D 사업인 “1 MW급 해수온도차발전 실증플랜트 개발(4/6) (PMS4080)”에 의해 수행되었습니다.

Author contributions

H. S. Lee; Conceptualization, Project administration, Data curation. J. H. Moon; Formal analysis, Investigation, Writing-original draft. H. J. Kim; Writing-review & editing, Project administration, Supervision.

References

1. L. A. Vega, 1992, “Chapter 7 of Ocean Energy Recovery : The State of the Art, Economics of Ocean Thermal Energy Conversion,” American Society of Civil Engineers, pp. 151-181
2. D. Tanner, 1995, “Ocean Thermal Energy Conversion : Current Overview and Future Outlook“, Renewable Energy, Vol. 6, pp. 367-373 ([https://doi.org/10.1016/0960-1481\(95\)00024-E](https://doi.org/10.1016/0960-1481(95)00024-E))
3. B. F. Tchanche, G. Lambrinos, A. Frangoudakis and G. Papadakis, 2011, "Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles - A review of various applications“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 3963-3979. (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.024>)
4. S. Lecompte, H. Huisseune, M. van den Broek, B. Vanslambrouck and M. De Paepe, 2015, "Review of organic Rankine cycle(ORC) architectures for waste heat recovery", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 47, pp. 448-461. (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.089>)
5. M. Aneke, B. Agnew and C. Underwood, 2011, "Performance Analysis of the Chena Binary Geothermal Power Plant", Journal of the Applied Thermal Engineering, Vol. 31, pp. 1825-1832. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.02.028>)
6. H. S. Lee, S. T. Lim, J. H. Moon and H. J. Kim, 2016, “Performance Assessment for High Temperature OTEC Plant”, Progress in Renewable Energies Offshore, Taylor & Francis Group, London, pp. 475-480.
7. J. I. Yoon, S. H. Seol, C. H. Son, K. H. Choi, Y. B. Kim, H. S. Lee, H. J. Kim and J. H. Moon, 2016, "Performance Analysis of Ejector-Pump Thermal Energy Conversion System Using Various Working Fluids", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 87-92. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.6.087>)