

Kalina 사이클의 효율 향상 방안 및 성능 비교

Improvement of Efficiency of Kalina Cycle
and Performance Comparison

윤정인* · 손창효**† · 최광환* · 손창민*** · 설성훈*** · 이호생**** · 김현주****
Yoon Jung-In*, Son Chang-Hyo**†, Choi Kwang-Hwan*, Son Chang-Min***,
Seol Sung-Hoon ***, Lee Ho-Saeng**** and Kim Hyeon-Ju****

(Received 20 August 2015; accepted 12 October 2015)

Abstract : In this paper, EP-Kalina cycle applying liquid-vapor ejector and motive pump is newly proposed. In this EP-Kalina cycle, the liquid-vapor ejector is used to increase pressure difference between inlet and outlet of the turbine. Also the motive pump enhances the performance of liquid-vapor ejector, resulting in increase of system efficiency of OTEC cycles. The comparison cycles in this study are basic, Kalina, EKalina and EP-Kalina ones. The pump work, net power, APRe, APRc, TPP and system efficiency of each cycle are compared. In case of net power, EP-Kalina cycle is lowest among the cycles due to the application of the motive pump. But, the net power difference of cycles seems to be minor since the pump work of cycles is merely about 1kW, compared to turbine gross power of 20kW. The system efficiency of EP-Kalina cycle shows 3.22%, relatively 44% higher than that of basic OTEC cycle. Therefore, the system efficiency is increased by applying the liquid-vapor ejector and the motive pump. Additional performance analysis is necessary to optimize the proposed EP-Kalina cycle.

Key Words : 해양온도차발전(Ocean thermal energy conversion), 칼리나 사이클(Kalina cycle), 액-증기 이젝터(Liquid-vapor ejector), 작동부 펌프(Motive pump), 시스템 효율(System efficiency), 순수 발전량(Net power)

**† 손창효(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

*윤정인, 최광환 : 부경대학교 냉동공조공학과

***손창민, 설성훈 : 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

****이호생, 김현주 : 선박해양플랜트연구소 해수플랜트 연구센터

**† Son Chang-Hyo(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.

E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

*Yoon Jung-In, Choi Kwang-Hwan : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.

***Son Chang-Min, Seol Sung-Hoon : Graduate school of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.

****Lee Ho-Saeng, Kim Hyun-Ju : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Seawater Utilization Plant Research Center

기 호 설 명

P	: 압력 (kPa)
PR	: 압력비 (-)
Q	: 열량 (kW)
W	: 일량 (kW)
h	: 엔탈피 (kJ/kg)
m	: 필요작동유체량 (kg/s)

그리스 문자

η	: 효율 [%]
--------	----------

하첨자

c	: Condenser
d	: Discharge of ejector
e	: Evaporator
i	: Inlet
m	: Motive of ejector
o	: Outlet
p	: Pump
s	: Suction of ejector
t	: Turbine

1. 서 론

화석연료를 이용한 무분별한 발전으로 지구 온난화 및 오존층 파괴가 지구환경을 악화시키고 있다. 이에 유럽국가에서는 화력 발전 비율을 줄이고 친환경적인 에너지 발전에 관심을 가지고 있다. 이러한 추세에 우리나라도 태양, 풍력, 지열 및 해양에너지 등을 이용한 발전비율을 증가시키고 있다. 그 중 해양온도차 발전시스템 (OTEC : Ocean Thermal Energy

Conversion)은 연간 온도가 일정한 표층수와 심층수 온도차를 이용한 발전이다. OTEC 시스템은 주야 관계없이 지속적으로 운전이 가능하며, 바닷물을 이용하기에 무한적인 에너지 수급이 가능한 장점이 있다. 하지만, 타 신재생에너지 발전보다 효율이 낮은 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 적합한 작동유체 선정 및 사이클 개발에 많은 노력을 기울이는 실정이다.¹⁾²⁾³⁾

지금까지 발표된 고효율 해양온도차 발전 사이클에 대한 종래연구를 살펴보면, 우선 Yoon 등⁴⁾⁵⁾은 재생기, 다단 터빈 및 액-증기 열교환기를 설치하여 기본 해양온도차발전 시스템의 효율보다 높은 사이클을 제안하였고, 그 사이클에 R717을 적용하여 성능 분석을 하였다. 그리고 액-증기 이젝터를 적용한 사이클에 혼합냉매를 이용하여 성능 분석을 하였다. 그 결과, 액-증기 이젝터를 적용한 사이클은 기본 사이클보다 약 16%의 효율 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

또한, Uehara 등⁶⁾은 물과 암모니아의 혼합물을 작동유체로 사용하고, 다단 터빈, 중간 열교환기(재생기와 히터), 다단 펌프 등을 추가한 고효율 해양온도차 발전 사이클을 제안한 후, 그 사이클의 성능을 분석하였다. 그 결과, 제안한 Uehara 사이클이 기본 사이클과 Kalina 사이클 보다 효율이 높음을 확인하였다.

He 등⁷⁾은 KCS(Kalina cycle system)에 다단 터빈을 추가 설치하고, 터빈의 설치위치 변화에 따른 성능을 비교하였다. 그 결과, 그들이 제안한 사이클이 Kalina 사이클의 효율 보다 증가하는 것을 확인하였다.

그리고, Li 등⁸⁾은 Kalina 사이클에 이젝터를 적용한 EKalina 사이클을 제안한 후, 작동유체인 암모니아 건도, 증발기의 열원 온도 등의 변화에 따른 성능을 분석한 결과, 제안한 사이

클의 효율이 약 8% 정도로 높은 값을 나타내었다.

이상의 관련 종래 연구들을 살펴본 결과, 기본 해양온도차발전시스템의 효율을 향상시키기 위한 방안으로, 재열기, 재생기, 이젝터 및 다단터빈 등을 설치하여 효율을 높이고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이젝터와 motive pump를 적용한 EP-Kalina 사이클을 제안하고, 여러 가지 사이클과 성능을 비교하였다. 이를 위해 성능 분석 모사 프로그램인 HYSYS⁹⁾를 이용하여 기본 해양온도차발전 사이클, Kalina 사이클, EKalina 사이클, EP-Kalina 사이클의 APRe, APRc, TPP, 순수발전량, 시스템 효율을 비교하였다.

2. 시스템과 이젝터 분석

2.1 시스템 분석 조건과 계산식

Table 1은 각각의 사이클을 비교하기 위한 분석 조건을 나타낸 것이다. 표를 살펴보게 되면, 우선 기본 사이클의 작동유체는 R717을 적용하였고, Kalina 사이클에는 R717(암모니

아)과 H₂O의 혼합냉매를 적용하였다. 기본 사이클에서 R717(암모니아)과 H₂O의 혼합냉매를 적용하지 않은 이유는 운전조건에서 물이 증발하지 않고 액상태로 터빈으로 유입되어 사이클 구동이 불가능하기 때문이다. 그리고 EKalina 와 EP-Kalina 사이클에서 R717의 비율이 0.55인 이유는 OTEC 사이클의 최고효율과 이젝터 구동에 필요한 H₂O의 유량을 확보하기 위해서이다. 해수의 온도는 표층수의 경우 연간 일정한 26℃를 이용하였으며, 심층수는 수심 200m이상에서 일정한 5℃를 이용하였다. 그리고 터빈 발전량을 20kW로 고정하여 각 사이클들을 비교하였다. 또한 증발기 출구 건도를 0.4로 40%는 증기로 터빈으로 유입되어 발전을 하고, 60%는 액인 상태로 나와 재생기에서 열 교환을 한다. EP-Kalina 사이클에선 작동부 펌프가 추가되어 펌프의 승압은 200kPa로 주었다. 펌프의 승압은 200kPa보다 높은 승압이 가능하지만, 정상적인 운전이나 펌프 비용측면에서 200kPa 정도가 적절하여 설정하였다. 각 분석조건으로 4가지 사이클의 성능을 비교하였다.

Table. 1 The analysis condition of OTEC system

Parameter	Unit	cycle name			
		Basic	Kalina	EKalina	EP-Kalina
Refrigerant	-	R717	R717+H ₂ O	R717+H ₂ O	R717+H ₂ O
Mass fraction of R717	kg/kg	1.00	0.96	0.55	0.55
Gross power of turbine	kW	20	20	20	20
Inlet temperature of surface water	℃	26	26	26	26
Outlet temperature of surface water	℃	23	23	23	23
Inlet temperature of deep water	℃	5	5	5	5
Outlet temperature of deep water	℃	10.8	10.8	10.8	10.8
Isentropic efficiency of turbine	%	80	80	80	80
Efficiency of working fluid pump	%	65	65	65	65
Heat exchanger LMTD	℃	3.5	3.5	3.5	3.5
Pressure ratio of ejector	-	-	-	6	6
Pressure difference of motive pump	kPa	-	-	-	200
Mass flow ratio at ejector (motive flow : suction flow)	-	-	-	6:4	6:4

비교할 내용으로는 터빈 발전량당 증발열량과 응축열량의 크기를 나타내는 APRe와 APRc가 있다. 각 증발열량과 응축열량에 터빈 발전량을 나눈 값으로 터빈 발전량은 20kW로 고정되어 있어 각 열량이 작으면 작을수록 값은 작아진다. 각 값은 아래의 식(1), (2)로 나타낸다.

$$APRe = \frac{Q_e}{W_t} \quad (1)$$

$$APRc = \frac{Q_c}{W_t} \quad (2)$$

식 (5)은 순수 발전량을 나타낸 것으로 터빈 발전량에 펌프일량을 감한 값이다. 각각의 펌프일량, 터빈 발전량은 아래의 식(3), (4)로 나타낸다.

$$W_p = \frac{m(h_{p,i} - h_{p,o})}{\eta_p} \quad (3)$$

$$W_t = \frac{m(h_{t,i} - h_{t,o})}{\eta_t} \quad (4)$$

$$W = W_t - W_p \quad (5)$$

TPP(Turbine Per Pump)는 각 사이클 내 20kW 터빈 발전량을 생산하기 위해 필요한 펌프 소비일량의 크기를 나타내는 지표로서, 펌프 일량 대비 터빈발전량으로 정의되며, 그 계산식은 다음과 같다.

$$TPP = \frac{W_t}{W_p} \quad (6)$$

그리고, 시스템 효율 계산식은 (7)로 정의된다. 터빈 발전량은 20kW로 고정되어 있어, 펌프

소요 동력이 작을수록, 증발열량이 작을수록 효율이 증가한다.

$$\eta = \frac{W}{Q_e} = \frac{W_t - W_p}{Q_e} \quad (7)$$

2.2 이젝터의 작동원리

Fig. 1은 Liquid-vapor ejector의 개략도 와 이젝터 내의 압력분포를 나타낸 것이다. 이젝터의 motive 부분의 액 상태의 작동유체(고압 부분)가 지나면서 suction 부분의 증기(저압 부분)를 흡입시켜 discharge 부분으로 나오게 된다. 즉 고압의 motive 유량을 이용하여 suction 압력을 원래 압력보다 낮은 상태로 만들어 기본 사이클보다 터빈 입·출구 압력차를 증가시킬 수 있다. 이에 동일 유량 대비 터빈 발전량이 증가하여 효율을 향상시킬 수 있다.

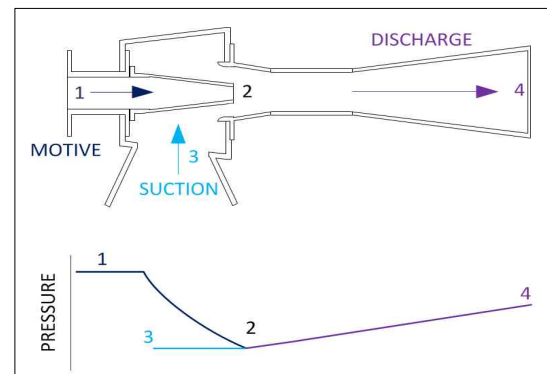


Fig. 1 Schematics diagram and pressure graph of the liquid-vapor ejector

Table 1에 설정된 Pressure Ratio(PR)는 이젝터의 압력 비를 수치적으로 나타낸 값이다. PR값은 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$PR = \frac{P_m - P_s}{P_d - P_s} \quad (8)$$

식(6)이 의미하는 것은 압력 회복량 대비 motive 압력차이다. 즉, motive 압력이 낮으면서 압력회복량이 높으면 이젝터의 효율이 좋아지는 것을 나타낸 것이다. PR 값은 작을수록 좋은 효율을 나타낸다. 본 논문에서는 이젝터 PR값을 6으로 설정하여 비교를 하였다. 이는 EKalina와 EP-Kalina 사이클의 최고 효율에 대한 유량비(6:4)를 결정하기 위해 설정하였다.

3. 사이클 구성

본 절은 본 연구에서 제안하는 해양온도차 발전 사이클(EP-Kalina 사이클)의 성능 비교를 위해서 EP-Kalina 사이클을 비롯하여 3가지 사이클의 구성, 작동원리, 장단점 등을 나타내었다.

3.1 기본 사이클

Fig. 2는 기본 해양온도차 발전 사이클의 개략도이다. 위 사이클은 증발기, 터빈, 응축기 및 펌프 등의 4가지 주요기기로 구성된다. 작동원리를 살펴보면, 우선 펌프를 지나 압력이 상승된 작동유체는(1번 지점) 증발기로 유입된다. 그 후 증발기에서 표층수와 열 교환하여 만들어진 고온고압의 증기는(2번 지점) 터빈으로 유입되어 전력을 생산하게 된다(3번 지점). 이후 응축기로 유입되어 차가운 심층수와 열 교환을 한 뒤 응축되어(4번 지점) 순환하는 사이클이다. 기본 해양온도차 발전 사이클에선 다른 사이클과 다르게 증발과 응축 열원의 온도차가 약 20℃밖에 차이가 나지 않아, 효율을 높이는데 어려움이 있다. 이에 각종 장치를 추가 설치하여 효율이 상승된 사이클을 제안하고 있다.

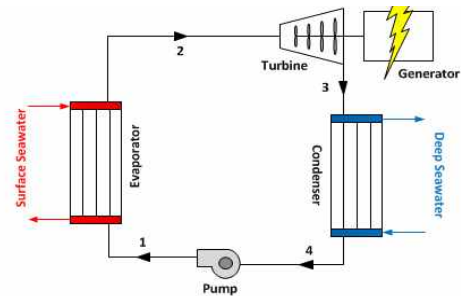


Fig. 2 Schematics of the basic OTEC cycle

3.2 Kalina 사이클

Fig. 3은 Kalina 사이클의 개략도를 나타낸 것이다. 이 사이클은 Fig. 2의 기본 사이클에서 기액 분리기와 재생기를 설치하여 증발열량을 줄여 효율을 상승시킨 것이다. Kalina 사이클의 작동원리는 증발기와 응축기에서 표층수 및 심층수와 열 교환하는 것은 기본 사이클과 동일하다. 차이점은 기액 분리를 설치하여 R717 증기는 터빈으로 유입되고(3번 지점)된다. 그리고 H2O는 증발기로 유입되기 전에 예열시켜 증발열량이 감소되어 효율이 향상되는 사이클이다.

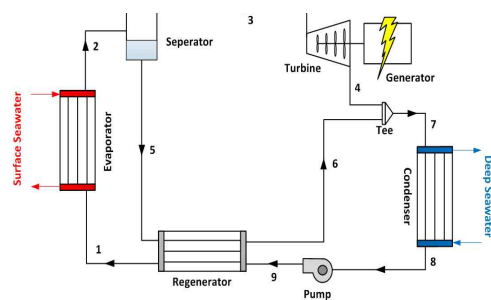


Fig. 3 Schematics of the Kalina cycle

3.3 EKalina 사이클

Fig. 4는 EKalina 사이클의 개략도를 나타낸 것이다. EKalina 사이클은 Kalina 사이클에 액-증기 이젝터를 적용한 것이다. 위에서

이젝터의 성능에 대해서 언급한 바와 같이 고압의 작동유체가 이젝터의 motive 부로 유입되어(6번 지점) 터빈 출구압력을 Kalina 사이클보다 더 낮은 압력으로 만든다. 이로 인해 터빈 압력차가 증가하여 동일 유량대비 터빈 발전량이 증가되고 효율이 상승하는 사이클이다. 그러나 motive 부의 압력이 높을수록 효율이 증가하지만, 증발기로 유입되는 작동유체의 압력은 증발압력까지만 상승할 수 있어, 이젝터의 효율이 제한적인 단점이 있다.

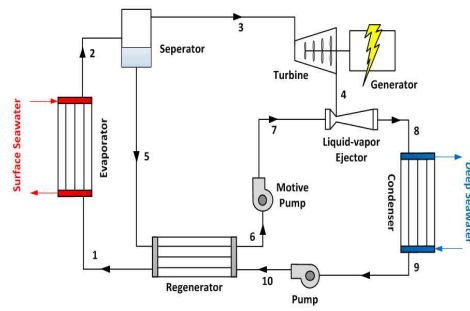


Fig. 5 Schematics of the EP-Kalina cycle

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 각 사이클별 펌프 일량과 순수 발전량을 비교한 것이다. 그래프를 비교해보면, 기본 해양온도차발전 사이클(BOTEC)은 Kalina 사이클과 비슷한 양상을 보여주고 있으며, EKalina 사이클과 EP-Kalina 사이클은 이젝터를 구동시키기 위한 Motive 유량이 필요하므로 펌프 일량이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 EP-Kalina 사이클은 motive pump로 인해 추가 펌프 일량의 증가로 가장 높은 펌프 일량을 보였으며, 순수발전량은 가장 낮은 것을 볼 수 있다. 하지만

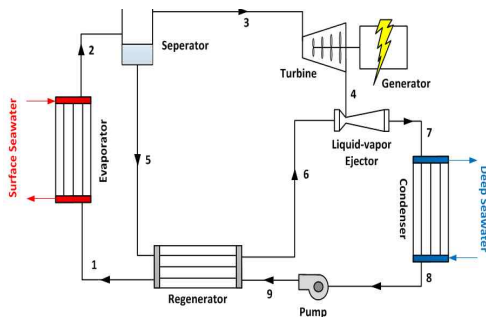


Fig. 4 Schematics of the EKalina cycle

3.4 EP-Kalina 사이클

Fig. 5는 EP-Kalina 사이클의 개략도를 나타낸 것으로, Kalina사이클에 이젝터와 motive pump를 설치하여 효율을 향상시킨 사이클이다. 이젝터의 성능은 앞에서 언급한 것과 같이, 터빈의 입·출구 압력차를 증가시켜 효율을 상승시켰다. 그리고 EKalina 사이클의 단점인 motive 부의 압력을 motive pump를 추가함으로써 증발압력보다 높은 motive 압력을 만들어 이젝터 효율을 향상 시켰다. 그 결과, suction부분의 압력이 더욱더 감소하므로, 압력차가 증가하여 동일유량 대비 터빈 발전량이 증가하고, 그 결과 사이클 효율도 향상된다.

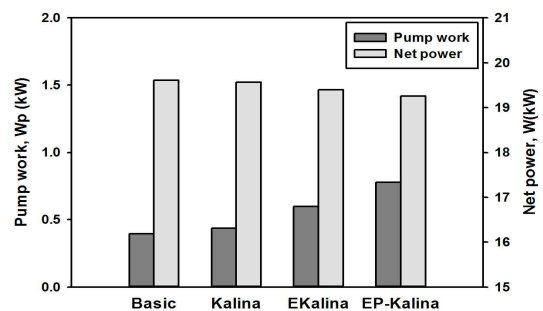


Fig. 6 Pump work and net power of various OTEC cycles

터빈 발전량이 20kW에 비해 펌프 일량은 1kW 이하의 값을 보이고 있어, 순수발전량의 크기를 비교하면 4가지 사이클의 차이는 미미한 것

을 볼 수 있다. 즉, 시스템 효율에 영향을 주지만 증발열량보다 적은 영향을 보일 것으로 예상된다.

Fig. 7은 식 (6)에서 정의된 TPP 결과를 나타낸 것이다. 여기서 TPP는 실제로 소요된 펌프 전력 대비 터빈에서 발전하는 전력의 비를 나타낸 것이다. Fig. 7로부터 알 수 있듯이, 순환펌프만 있는 기본 OTEC 사이클이 가장 높았으며, EP-Kalina 사이클은 motive pump에 소요되는 동력이 있어, 가장 작은 값을 보였다. 본 논문에서 터빈 발전량을 20kW로 고정하고 비교 하였기에, 펌프 일량이 작으면 TPP의 값이 큰 것을 알 수 있다. 이 TPP 지수로 확인 할 수 있는 것은 시스템 효율을 생각하지 않고 전력생산만을 생각한다면 TPP의 값이 증가하도록 시스템을 개발하는 것이 좋다.

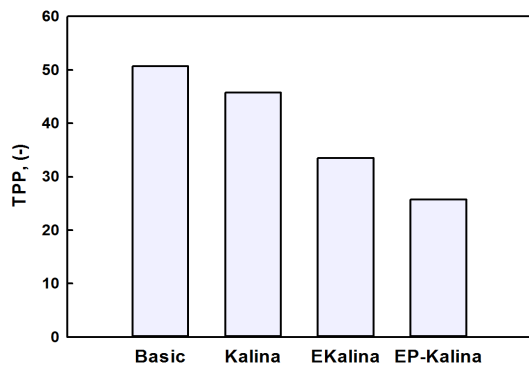


Fig. 7 TPP of various OTEC cycles

Fig. 8은 APRe와 APRc를 나타낸 그래프이다. APRe와 APRc의 크기는 거의 비슷하였고, 응축열량이 증발열량보다 작은 값을 보였다. 증발열량 및 응축열량이 가장 작은 EP-Kalina 사이클이 각 APRe와 APRc이 작았다. 이는 이젝터와 motive pump를 이용하여 터빈 입·출구 압력차가 증가하게 된다. 터빈 압력차가 크다는 것은 동일 유량으로 증가된 터빈 발전량

을 생산할 수 있다. 즉, 적은 유량으로 20kW를 발전할 수 있어 증발기에서 필요한 증발열량이 감소하게 된다.

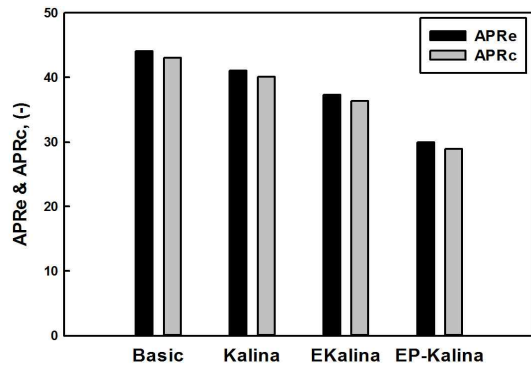


Fig. 8 APRe and APRc of various OTEC cycles

해양온도차 발전 시스템에서 중요한 시스템 효율을 비교한 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. 시스템 효율에서 기본 해양온도차발전 사이클의 효율은 2.23%로 가장 작았으며, EKalina 사이클은 2.60%, EP-Kalina 사이클은 3.22%로 가장 높은 효율을 나타내었다. 이젝터를 적용한 EKalina 사이클은 기본 사이클 보다 약 16.6%가 증가하였고, motive pump를 설치하여 이젝터 효율을 증대시킨 EP-Kalina 사이클은 약 44%의 효율 향상을 보였다. 이젝터를 적용한

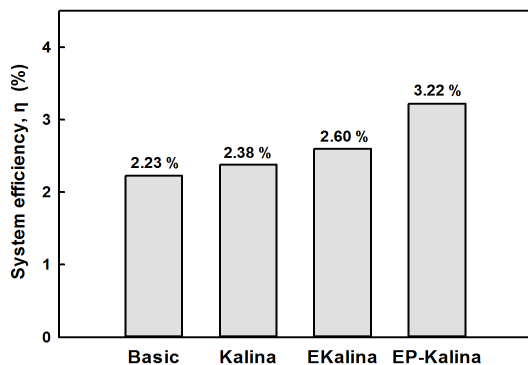


Fig. 9 System efficiency of various OTEC cycles

사이클은 이젝터 구동을 위한 유량이 증가하여 펌프 일량이 증가하여 효율이 감소해야 하지만, 이젝터가 시스템 효율에 미치는 영향보다 미미하여 전체적인 시스템 효율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 Motive pump로 펌프 일량이 증가하였지만, 이젝터 효율 증가분이 더 상승하여 효율이 높아진 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 기본 사이클, Kalina 사이클, EKalina 사이클과, 본 연구에서 제안한 EP-Kalina 사이클의 기초 설계 자료를 제공하고자 4가지 사이클의 펌프 일량, 순수발전량, TPP, APRe, APRc 및 시스템 효율을 비교하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

우선, 순수발전량 및 펌프일량의 비교 결과로부터, 기본 사이클이 가장 높았으며, EP-Kalina 사이클이 가장 낮았다. 이는 이젝터 구동을 위한 유량의 증가로 인해 펌프일량이 증가하여 순수발전량이 감소하였기 때문이다.

TPP에선 기본 사이클이 가장 높은 값을 보였으며, motive pump로 인한 펌프일량 증가로 EP-Kalina 사이클이 가장 작은 값을 보였다.

APRe와 APRc는 기본 사이클이 가장 높았으며, EP-Kalina 사이클이 가장 낮은 값을 나타내었다. 이젝터 및 펌프로 인해 터빈 입·출구 압력이 증가하여, 적은 유량으로 터빈 발전량 20kW를 생산할 수 있기 때문에 열교환기에서 필요한 증발 및 응축열량이 줄어든다. 이에 열교환기 소형화가 가능한 장점이 있다.

시스템 효율측면에서는 EP-Kalina 사이클에서 motive pump가 설치되어 필요한 소요 동력증가분은 미미하지만, 이젝터 효율 향상분이 크므로 전체적인 시스템 효율이 더 많이 상

승한 것을 알 수 있다. 즉, 기본 사이클이 2.23%, EP-Kalina 사이클이 3.22%를 보였다. EP-Kalina 사이클 효율은 기본 대비 약 44% 정도 상승되었다. 또한 현재까지 제안된 사이클 중에 효율이 가장 높은 Uehara 사이클 (2.38%)보다도 약 36% 향상되었다. 따라서 추후 실제 성능실험의 제작 및 실험을 통해 효율이 높은지를 확인할 필요가 있을 것으로 생각된다.

이상으로 기본 해양온도차 발전 시스템에 이젝터와 motive pump를 적용하는 것이 효율 향상방안으로 타당하리라 판단된다. 추후 효율이 가장 높은 EP-Kalina 사이클을 설계 및 제작하여, 이론 분석 데이터와 실제 성능 실험 데이터를 비교하여, EP-Kalina 사이클의 설계 자료를 제공하고자 한다.

후 기

본 연구결과는 선박해양플랜트연구소가 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발” 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

Reference

1. Yoon. J. I, Son. C. H, Ye. B. H, Heo. J. H, Kim. H. J and Lee. H. S, Performance analysis of 20kW OTEC Power cycle using various working fluids, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 37, No. 8, pp. 829-835, 2013.
2. Ko. S. H and Chung. B. J, Electricity Cost Variations subject to Nuclear and Renewable Power Portions, Journal of Energy Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 14-22, 2006.
3. L. Syamsuddin, A. Adli, P. Nugraha, S. Gibran, Q. Afifah and N. Oriana, OTEC Potential in the Indonesian Seas, Energy Procedia, Vol. 65, pp. 215-222, 2015.

4. J. I. Yoon, C. H. Son, S. m. Beak, B. H. Ye, H. J. Kim and H. S. Lee, Performance characteristics of a high-efficiency R717 OTEC power cycle, Applied Thermal Engineering, Vol. 72, No. 2, pp. 304-308, 2014.
5. 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, Performance anlysis of OTEC power cycle with a liquid-vapor ejector using R32/R152a, Heat Mass Transfer, Vol. 15, No. 3, pp. 1-10, 2014.
6. H. Uehara, Y. Ikegami and T. Nishida, Performance analysis of OTEC system using a cycle with absorption and extraction processes, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. (Part B) 64, pp. 384-389, 1998.
7. J. He, C. Liu, X. Xu, Y. Li, S. Wu and J. Xu, Performance research on modified KCS(Kalina cycle system) 11 without throttle valve, Energy, Vol. 64, No. 1, pp. 389-397, 2014.
8. X. Li, Q. Zhang and X. Li, A Kalina cycle with ejector, Energy, Vol. 54, No. 1, pp. 212-219, 2013.
9. Aspen HYSYS, version 8.6, Aspen Technology Inc., 2014.