

온배수와 표층수를 이용하는 R134a용 유기 랭킨사이클의 성능 비교

윤정인¹ · 손창효[†] · 백승문² · 김현주³ · 이호생⁴

(원고접수일 : 2012년 7월 23일, 원고수정일 : 2012년 8월 27일, 심사완료일 : 2012년 9월 11일)

Performance Comparison of R134a Organic Rankine Cycle (ORC) Using Hot Wastewater and Surface Seawater

Jung-In Yoon¹ · Chang-Hyo Son[†] · Seung-Moon Baek² · Hyeon-Ju Kim³ · Ho-Saeng Lee⁴

요약 : 유기 랭킨사이클의 증발기 2차 유체로서 화력발전소에서 버려지는 35℃의 온배수를 이용하는 경우와 25℃의 해양 표층수를 이용하는 경우의 사이클 특성을 서로 비교한 후, 유기 랭킨사이클에 화력발전소에서 버려지는 온배수를 유기 랭킨 사이클에 적용 가능한지를 확인 하였다. 본 연구에서 고려된 작동변수는 과열도, 과냉각도, 터빈효율, 펌프효율 등이다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. 화력발전소에 배출되는 35℃의 온배수를 적용한 유기 랭킨사이클의 효율이 25℃의 표층수를 적용한 유기 랭킨사이클에 비해 87% 이상 높게 나타났다. 따라서 화력발전소의 온배수를 유기 랭킨사이클에 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

주제어 : 성능 비교, 유기 랭킨사이클, 온배수, 표층수, R134a

Abstract: This study was performed to find out the possibility that hot waste water from a thermoelectric power plant can be applied to Organic Rankine Cycle (ORC) by comparing the performance characteristics for use of the ocean surface water (25℃) and hot waste water (35℃) as a secondary fluid. The parameters considered in this study are four; superheating temperature, subcooling temperature, turbine efficiency, and pump efficiency. Main results of this study are summarized as follows : Overall efficiency of applying hot waste water to ORC is 87% higher than that of surface water. Thus it could be confirmed that hot waste water of the thermoelectric power plant can be applied to ORC.

Key words: Performance comparison, Organic Rankine cycle, Hot wastewater, Surface seawater, R134a

1. 서 론

우리나라는 지속적인 경제성장에 따라 매년 에너지소비가 증가하는 추세이고, 에너지 수입의존도 역시 늘어나고 있어, 에너지 부족 문제로 인해 에너지 수급 위기에 봉착해 있다. 따라서 신·재생에너지가 친환경적인 청정에너지로서 화석에너지 고갈, 국내외의 환경규제강화로 인해 주요 대체에너

지원이 될 것으로 전망한다. 특히 해양은 대략 지구 표면의 약 75%를 차지하고 있으며 막대한 청정 에너지를 보유하고 있다. 이미 선진국에서는 해양 에너지를 실용화 단계까지 개발하고 있으며, 우리나라에서도 지속적으로 이와 관련된 연구를 실시하고 있다. 이와 관련된 대표적인 연구로는 유기 랭킨사이클(Organic Rankine Cycle)이 있는데, 유기 랭킨사이클은 해양의 담수 플랜트 및 소규모 발전

[†] 교신저자(부경대학교 냉동공조공학과, E-mail: sonch@pknu.ac.kr, Tel: 051-621-6802)

1 부경대학교 냉동공조공학과, E-mail: yoonji@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

2 부경대학교 대학원, E-mail: hottock77@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6180

3 한국해양연구원 해양심층수연구센터, E-mail: hyeonju@kiost.ac, Tel: 054-780-5200

4 한국해양연구원 해양심층수연구센터, E-mail: hoslee@kordi.re.kr, Tel: 054-780-5200

용도로 많이 사용된다. 유기 랭킨사이클은 바이오 매스, 지열, 태양열, 공정 과정에서의 폐열과 같은 다른 요소들로부터 저온의 열을 이용한다. 유기 랭킨사이클과 기존 랭킨사이클의 주요 차이점은 작동유체이다. 유기 랭킨사이클에서 작동유체의 끓는 점은 증기보다 매우 낮다. 이런 이유로 터빈이나 팽창기의 작동을 위한 증기를 발생하기 위해 높은 온도에 도달시킬 필요가 없으므로 유기랭킨사이클은 물을 사용하는 랭킨사이클보다 더 낮은 온도에서 구동이 가능하다[1,2]. 그러므로 유기 랭킨사이클은 버려지는 배열을 활용하는 친환경기술로서, 최근 그 사용이 급격히 증가하는 신재생에너지 기술이다. 유기 랭킨사이클로 활용 가능한 에너지로는 화력발전소에서 나오는 35°C의 온배수와 25°C의 해양 표층수가 있다. 이러한 배열 중에서 화력발전소에서 나오는 온배수는 해양 표층수에 비해 상대적으로 높은 양질의 수온을 지속적으로 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 유기 랭킨사이클은 지속적으로 일정한 온도의 2차 유체가 공급이 되는 것이 관건인데, 낮은 온도에서 구동 가능한 유기 랭킨사이클의 2차 유체로서 화력발전소의 온배수를 이용하여 구동시킬 경우, 화력발전소에서 버려지는 온배수의 이용가치를 높일 수 있다. 더군다나 우리나라 동해는 지형적으로 수심이 깊어서 5°C 정도의 낮은 온도의 심층수가 존재하는 유리한 지형 조건으로[3], 저온의 심층수의 획득이 가능한 장점을 가지고 있어 유기 랭킨사이클 구동시 낮은 온도의 2차 유체를 지속적으로 공급받을 수 있는 장점이 있다[4]. 따라서 본 논문에서는 EES(Engineering Equation Solver)[5] 프로그램을 이용하여 여름철 강원도 영동 소재 화력발전소에서 배출되는 35°C[6]의 온배수와 25°C의 해양 표층수를 유기 랭킨사이클의 2차 유체로 적용하여 구동시켰을 경우, 발전 사이클 특성의 비교를 통하여 연간 해양으로 버려지고 있는 발전소의 온배수를 유기 랭킨사이클에 적용 가능한 지를 검토하고, 실용화에 가능성에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다. 이를 위해 R134a 냉매용 유기 랭킨사이클에 영향을 미치는 변수들을 파악한 후, 여러 인자들에 대한 영향을 분석하였다.

2. 성능분석

Figure 1은 본 논문에서 분석하고자 하는 기본 유기랭킨사이클의 개략도를 나타낸 것이다. 이 시스템은 증발기, 응축기, 터빈, 펌프 등으로 구성되고 작동유체는 10~40°C 범위의 온도영역에서 성능이 우수한 R134a 냉매를 사용하였다[7]. 그리고 증발기의 2차 유체는 화력발전소에서 배출되는 35°C의 온배수와 25°C의 해양 표층수를 사용하였다. 본 연구의 성능 비교에 필요한 분석범위는 Table 1에 나타내었다. Table 1의 성능 분석범위는 일반적으로 발전소에 적용되는 유기랭킨사이클의 운전조건이다.

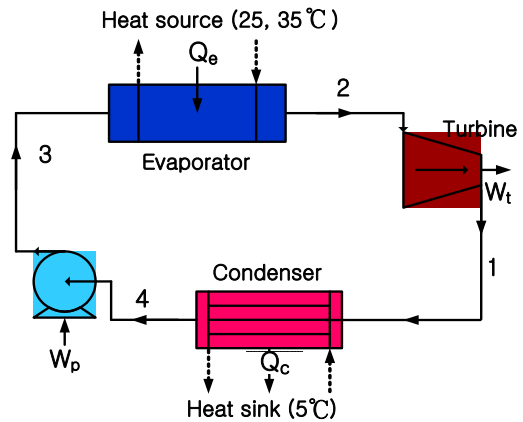


Figure 1: Schematic of R134a organic Rankine cycle.

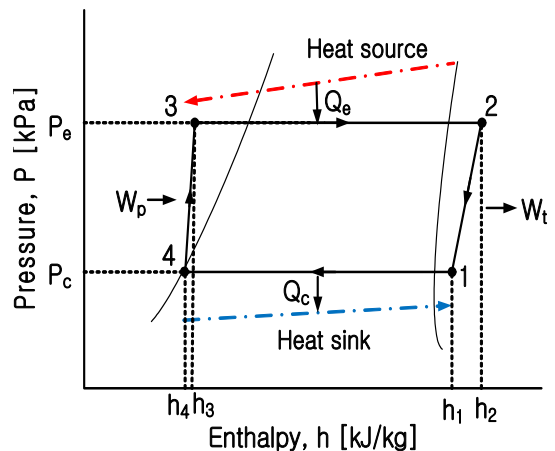


Figure 2: P-h diagram of R134a organic Rankine cycle.

Figure 2는 기본 유기랭킨사이클 사이클의 P-h 선도를 나타낸 것으로, 2개의 정압과정과 2개의 단열과정으로 이루어져 있다. 그리고 증발기의 냉매는 히트소스(heat source)로부터 열을 흡수하고, 응축기의 냉매는 히트싱크(heat sink)로 열을 방출하면서 터빈에서 일을 생산하게 된다.

Table 1: Analysis range of R134a organic Rankine cycle.

Refrigerant	R134a
Condensation temperature, T_c [°C]	10*
Evaporation temperature, T_e [°C]	20*, 30
Superheating temperature, ΔT_{suh} [°C]	5*, 10, 15, 20
Subcooling temperature, ΔT_{suc} [°C]	5*, 10, 15, 20
Mass flow rate of refrigerant, m [kg/s]	0.1
Heat source flow rate, m_{sf} [kg/s]	1
Heat sink flow rate, m_{cs} [kg/s]	1
Heat source temperature, $T_{sf,in}$ [°C]	25, 35
Heat sink temperature, $T_{cs,in}$ [°C]	5
$(T_{sf,in} - T_e)$ [°C]	5
$(T_c - T_{cs,in})$ [°C]	5
Turbine efficiency η_t [/]	0.65, 0.75, 0.85*, 0.95
Pump efficiency η_p [/]	0.65, 0.75, 0.85*, 0.95
* Reference value	

R134a 냉매를 적용한 유기랭킨사이클의 성능 분석을 위해 열교환기(증발기, 응축기) 내의 냉매 압력강하와 열손실도 무시하였으며, 사이클 내 배관의 압력강하와 열손실은 무시하였다. 그리고 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없는 것으로 가정하였다.

또한 기본 유기랭킨사이클의 성능 분석에 필요

한 식들은 Table 2에 정리하였다. 우선, 유기랭킨사이클의 효율은 아래의 식 (1)으로 계산하였다.

$$\eta_{orc} = \frac{W}{Q_e} \quad (1)$$

$$W = W_t - W_p \quad (2)$$

식 (2)와 같이 시스템 전체일량(W)은 터빈일량(W_t)에서 펌프일량(W_p)을 뺀 값이다. 그리고 식(1)의 증발열량(Q_e)는 Table 2의 식을 사용하여 계산하였다.

본 논문에서 사용되는 R134a 냉매의 열역학적 물성치와 유기랭킨사이클의 성능 분석은 EES 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

Table 2: Energy balance equation of each components of R134a organic Rankine cycle.

Component	Energy	Mass
Evaporator (3→2)	$Q_e = \dot{m}(h_2 - h_3)$	$m = m_1$
Turbine (2→1)	$W_t = \dot{m}(h_2 - h_1)\eta_t$	$= m_2$
Condenser (1→4)	$Q_c = \dot{m}(h_1 - h_4)$	$= m_3$
Pump (4→3)	$W_p = \dot{m}(h_3 - h_4)/\eta_p$	$= m_4$

3. 실험결과 및 고찰

Figure 3은 유기랭킨사이클의 증발기 2차 유체로 해양 표층수 온도 25°C와 발전소 온배수 35°C를 각각 적용했을 경우, 증발기 출구 과열도(ΔT_{suh}) 변화에 따른 R134a용 유기랭킨사이클의 효율, 전체일량, 증발열량을 서로 비교한 것이다.

Figure 3에서 알 수 있듯이, 2차 유체 온도가 25°C와 35°C인 경우 모두 증발기 출구 과열도가 증가할수록 증발열량과 전체일량은 증가하였다. 이는 증발기 출구 과열도가 증가할수록 증발기의 입출구의 엔탈피차이가 커지기 때문에 증발열량은 증가하는 것으로 판단된다. 그리고 증발기 출구의 과열도가 증가할수록 펌프의 일량은 일정하지만 터빈입구의 엔탈피의 값의 증가로 인해 터빈일량이 증가하는데, 이로 인해 전체일량이 증가하는 것으

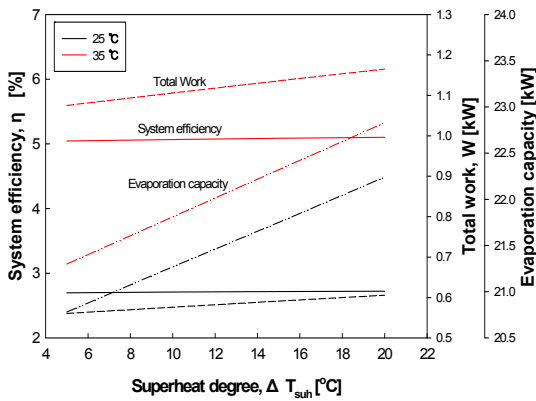


Figure 3: Performance characteristics of R134a organic Rankine cycle with superheating degrees.

로 판단된다. 사이클의 효율은 과열도가 증가할수록 증발열량과 전체일량의 증가비율이 거의 일정한 결과를 나타내며, 이로 인해 시스템의 효율은 과열도에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내는 것으로 보인다.

또한 2차 유체 온도가 25°C와 35°C인 경우, 증발기 2차 유체를 35°C로 유기 랭킨사이클에 적용한 경우가 25°C의 해양 표층수를 적용한 경우에 비해서 증발열량은 2.58% 정도 증가하는 결과를 나타내었으며 전체일량은 92.08% 정도 증가함을 보였다. 전술한 결과로부터 알 수 있듯이, 증발기 2차 유체에 25°C의 해양 표층수 보다 35°C의 온배수를 적용하는 경우, 시스템 전체 효율이 87.43% 증가됨을 알 수 있었다. 따라서 기본 유기랭킨사이클의 성능을 향상시키기 위해서는 발전소에서 버려지는 35°C의 온배수를 적용하는 것이 유리하다고 생각된다.

Figure 4는 유기 랭킨사이클의 증발기 2차 유체로 해양 표층수 온도 25°C와 발전소 온배수 35°C를 각각 적용했을 경우, 응축기 출구 과냉각도(ΔT_{suc}) 변화에 따른 R134a용 유기 랭킨사이클의 효율, 전체일량, 증발열량을 서로 비교한 것이다.

Figure 4에서 알 수 있듯이, 2차 유체 온도가 25°C와 35°C인 경우, 모두 응축기 출구 과냉각도가 증가할수록 증발열량과 전체일량은 증가하였으나, 전체일량의 증가는 상대적으로 작아짐을 보였다.

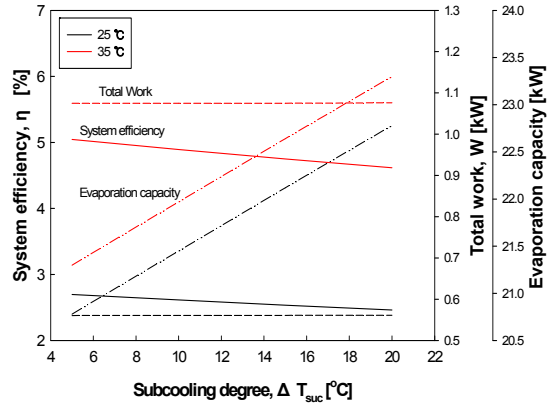


Figure 4: Performance characteristics of R134a organic Rankine cycle with subcooling degrees.

증발열량은 과냉각도 가 증가할수록 증발기 입구의 엔탈피가 낮아지기 때문에 증가하는 것으로 판단되며, 전체일량의 증가는 펌프일량은 일정하지만 터빈일량의 증가로 인한 것으로 판단된다. 시스템의 효율은 과냉각도가 증가할수록 시스템 효율은 감소하였는데, 이는 증발열량이 전체일량보다 더 많이 증가하기 때문에 시스템의 효율은 감소하는 것으로 판단된다. 또한 2차 유체 온도가 25°C와 35°C인 경우와 비교했을 때, 2차 유체 온도가 35°C인 경우가 2차 유체 온도가 25°C인 경우에 비해 평균 증발열량은 2.38% 정도 증가하였으며, 전체일량은 91.69% 증가하였다. 이로 인해 2차 유체 온도를 35°C로 높일 경우 시스템 전체 효율이 87.46% 정도 증가함을 확인 할 수 있었다.

Figure 5는 유기 랭킨사이클의 증발기 2차 유체로 해양 표층수 온도 25°C와 발전소 온배수 35°C를 각각 적용했을 경우, 터빈효율(η_t) 변화에 따른 R134a용 유기 랭킨사이클의 효율, 전체일량, 증발열량을 서로 비교한 것이다.

Figure 5에서 알 수 있는 것처럼, 2차 유체 온도가 25°C와 35°C 경우, 모두 터빈효율이 증가할수록 전체일량은 증가하며, 증발열량은 터빈효율에 관계없이 일정함을 보였다. 이는 터빈효율이 증가할수록 터빈일량이 증가하며 이로 인해 전체일량은 증가하는 것으로 판단된다. 그리고 증발열량은 터빈 효율과는 무관하기 때문에 일정한 것으로 판단된

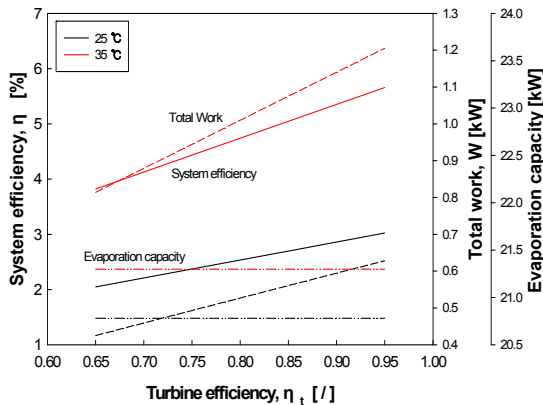


Figure 5: Performance characteristics of R134a organic Rankine cycle with turbine efficiencies.

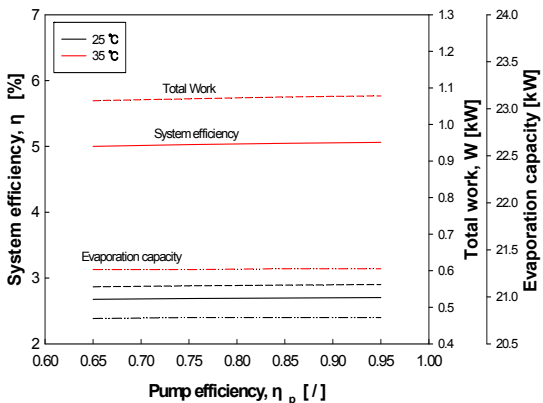


Figure 6: Performance characteristics of R134a organic Rankine cycle with pump efficiencies.

다. 따라서 증발열량이 일정한 반면, 전체일량이 증가하므로 사이클의 효율은 증가함을 확인 할 수 있었다.

또한 2차 유체 온도가 25°C와 35°C인 경우를 비교했을 때, 2차 유체 온도가 35°C인 온배수가 2차 유체 온도가 25°C인 표층수에 비해 평균 증발열량은 2.5% 정도 증가하였으며 전체일량은 91.63% 정도 증가함을 확인 할 수 있었다.

이로 인해 2차 유체 온도를 35°C인 온배수로 적용할 경우 시스템 전체 효율이 87.28% 정도 증가됨을 알 수 있었다.

Figure 6은 유기 랭킨사이클의 증발기 2차 유체로 해양 표층수 온도 25°C와 발전소 온배수 35°C

를 각각 적용했을 경우, 펌프효율(η_p) 변화에 따른 R134a용 유기랭킨사이클의 효율, 전체일량, 증발열량을 서로 비교한 것이다.

Figure 6에서 2차 유체 온도가 각각 25°C와 35°C인 경우, 모두 펌프효율이 증가할수록 전체일량은 1%정도 미미하게 증가하였으며, 증발열량은 터빈효율에 관계없이 일정함을 보였다. 이는 펌프효율이 증가할수록 펌프일량이 감소하며 이로 인해 터빈일량과 펌프일량의 차이인 전체일량은 증가하는 것으로 판단된다. 그리고 증발열량은 펌프효율과는 무관하기 때문에 일정한 값을 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 증발열량이 일정한 반면, 전체일량이 미약하게 증가하므로 사이클의 효율은 미약하게 증가함을 보였다.

또한 2차 유체 온도가 25°C와 35°C인 경우를 비교했을 경우, 2차 유체 온도가 35°C인 온배수의 경우가 2차 유체 온도가 25°C인 표층수에 비해 평균 증발열량은 2.49% 정도 증가하였으며 전체일량은 91.61% 높아지는 결과를 나타내었다. 이로 인해 2차 유체 온도를 35°C로 높일 경우 시스템 전체 효율이 87.21% 증가됨을 알 수 있었다. 따라서 위의 결과로부터, 35°C의 온배수와 25°C의 표층수를 적용한 유기 랭킨사이클의 효율은 펌프효율 변화에 따라서 거의 변화가 없는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

지금까지 유기 랭킨사이클의 증발기 2차 유체로서 35°C의 온배수와 25°C의 표층수를 적용한 후, 증발기 출구 과열도($\Delta T_{su,h}$), 과냉각도($\Delta T_{su,c}$), 터빈 효율(η_t), 펌프효율(η_p) 변화에 따른 R134a용 유기 랭킨사이클의 효율, 전체일량, 증발열량을 Table 2의 운전조건에서 서로 비교하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 증발기 출구 과열도 변화시 2차 유체 온도 25°C와 35°C 모두 증발기 출구 과열도가 증가할수록 증발열량과 전체일량은 증가함을 보였으며, 시스템의 효율은 과열도에 관계없이 거의 일정하였고 동일 조건에서 2차 유체온도를 35°C로 높일 경우 시스템 전체 효율은 87.43% 정도 증가함을 알 수 있었다.

(2) 증발기 출구 과냉각도 변화시 2차 유체 온도 25℃와 35℃에서 응축기 출구 과냉각도가 증가할수록 증발열량과 전체일량은 증가함을 보였으며, 사이클의 효율은 과냉각도가 증가할수록 효율은 감소하였고 동일 조건에서 2차 유체 온도를 35℃로 높일 경우 시스템 전체 효율은 87.46% 증가함을 알 수 있었다.

(3) 터빈효율 변화시 2차 유체 온도 25℃와 35℃에서 터빈효율이 증가할수록 전체일량은 증가하고, 증발열량은 터빈효율에 관계없이 일정하며, 사이클의 효율은 전체일량은 증가하고 증발열량은 일정함에 따라 증가하였고 동일조건에서 2차 유체 온도를 35℃로 높일 경우 시스템 전체 효율은 87.28% 증가함을 알 수 있었다.

(4) 펌프효율 변화시 2차 유체 온도 25℃와 35℃에서 펌프효율이 증가할수록 전체일량은 미미하게 증가하고, 증발열량은 터빈효율에 관계없이 일정하며, 사이클의 효율은 전체일량은 증가하고 증발열량은 일정함에 따라 증가하였고 2차 유체 온도를 35℃로 높일 경우 시스템 전체 효율은 87.21% 증가함을 알 수 있었다.

(5) 따라서 위의 결론으로부터, 유기 랭킨사이클의 증발기 2차 유체로서, 35℃인 화력발전소 온배수를 적용하는 것이 25℃의 해양 표층수를 적용하는 것에 비해서, 시스템의 전체효율은 87%이상 향상됨을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 논문의 연구결과로부터, 화력발전소에서 버려지는 온배수를 기본 유기랭킨사이클에 적용 가능하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부가 지원하는 “해양심층수의 에너지 이용기술 개발” 성과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Rayegan and Y.X. Tao, “A procedure to select working fluids for Solar Organic Rankine Cycles (ORCs),” *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 659-670, 2011.
- [2] Zhang Shengjun, Wang Huaixin and Guo Tao,

“Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperaturegeothermal power generation,” *Applied Energy*, vol. 88, pp. 2740-2754, 2011.

- [3] H. J. Kim, H. S. Lee, D. H. Jung et al., “Analysis of 1MW closed OTEC cycle using thermal effluent and waste heat,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 470-476, 2010.
- [4] J. I. Yoon, S. M. Baek and C. H. Son, “Power system for ocean thermal energy conversion,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 217-223, 2012.
- [5] EES: Engineering Equation Solver, 2006. fChart Software Inc.
- [6] H. S. Lee, D. H. Jung, D. S. Moon et al., “Characteristics of ocean thermal energy in korean waters,” *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 2011 Autumn annual conference, p. 289, 2011.
- [7] Bahaa Saleh, Gerald Koglbauer, Martin Wendland, et al. “Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles,” *Energy*, vol. 32, pp. 1210 - 1221, 2007.