

## 온배수를 이용한 혼합냉매용 해양온도차 발전 사이클의 성능 특성

### Performance Characteristics of a Mixed Refrigerant OTEC Power Cycle Using Hot Waste Water

윤정인\* · 손창효\*† · 허정호\*\* · 예병효\*\* · 김현주\*\*\* · 이호생\*\*\*

Jung-In Yoon\*, Chang-Hyo Son\*†, Jeong-Ho Heo\*\*, Byoung-Hyo Ye\*\*,  
Hyun-Ju Kim\*\*\*, Ho-Saeng Lee\*\*\*

(접수일 : 2013년 10월 25일, 수정일 : 2013년 11월 06일, 채택확정 : 2013년 11월 06일)

**Abstract:** In this paper, the performance analysis for evaporation capacity, total work and efficiency of the ocean thermal energy conversion(OTEC) power system using mixed refrigerant(R32,R152a) is conducted to find the effect of hot wasted water on OTEC power system. The system in this study is applied with two stage turbine, regenerator, cooler and separator on Organic Rankine Cycle. The commercial program HYSYS is used for the performance analysis. The main results were summarized as follows : The efficiency of the OTEC power cycle has a largely effect on the evaporation capacity and total work. As increasing temperature of heat source water, evaporator's capacity is decreased but total work increase. Otherwise, using hot wasted water bring effects not only increasing system efficiency but also declining evaporator's capacity. Thus With a thorough grasp of these effect, it is necessary to find way to use hot wasted water emitted by power plant and so on.

**Key Words :** OTEC Power Cycle, Performance Analysis, Hot Waste Water, Mixed Refrigerant, Total Work, Evaporation Capacity, HYSYS.

#### — 기 호 설 명 —

m : 유량 [kg/s]  
Q : 열량 [kW]  
T : 온도 [°C]

W : 일 [kW]  
x : 건도 [ / ]  
η : 효율 [ / ]  
ΔP : 압력강하 [kPa]  
ΔT : 온도차 [°C]

\*† 손창효(교신저자) : 부경대 냉동공조공학과  
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180  
\*윤정인 : 부경대 냉동공조공학과  
\*\*예병효, 허정호 : 부경대 냉동공조공학과 대학원  
\*\*\*김현주, 이호생 : 한국해양과학기술원 해양심층수연구센터

\*† Chang-Hyo Son(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.  
E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180  
\*Jung-In Yoon : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.  
\*\*Byoung-Hyo Ye, Jeong-Ho Heo : Graduate school of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, Pukyong University.  
\*\*\*Hyun-Ju Kim, Ho-Saeng Lee : Korea Institute of Oceans Science and Technology.

## 하첨자

c	: 응축기
co	: 냉각기
e	: 증발기
t	: 터빈
p	: 펌프
in	: 입구
out	: 출구
ss	: 표층수
ds	: 심층수

## 1. 서 론

해양온도차(Ocean Thermal Energy Conversion, 이하 OTEC)발전은 표층수(약 26℃)와 심층수(약 5℃)의 온도차를 이용한 발전으로 해양에너지를 기반으로 하기 때문에 오염물 배출이 없고 주·야구별 없이 전력생산이 가능한 발전이다.<sup>1)</sup> 그러나 다른 신재생에너지 발전 시스템에 비하여 효율이 상당히 낮은 것이 단점이다.

많은 연구자들이 기존 OTEC 발전의 단점을 보완하기 위하여 시스템 구성기기 및 구조에 변화를 주거나, 여러 작동유체를 사용하여 시스템의 변화를 연구하거나 발전소 및 제철소 등으로부터 발생하는 열을 이용하여 표층수온도를 상승하는 방법 등이 연구되고 있다.

기존의 OTEC 발전 시스템에 관한 연구를 살펴보면, 우선 Kim<sup>2)</sup>등은 폐쇄형 OTEC 발전 사이클에 재생기와 기액분리기 그리고 다단터빈 장착에 따른 OTEC 발전 시스템의 성능에 대한 연구하였다. 그 결과, 기존의 OTEC 발전 사이클에 재생기와 다단 터빈을 적용하는 것이 효율 상승에 기여함을 밝혔다. Jung<sup>3)</sup>등은 해수 히트펌프 시스템에 R32와 R152a로 구성된 혼합냉매를 적용하여 대체 냉매로써 충분한 역할을 할 수 있음을 주장했다. 이어서 Yoon<sup>4)</sup>등은 재생기와 다단터빈 및 기액분리기를 장착한 고효율 OTEC 발전 사이클을 제안했다. 또 이 제안된 사이클에 혼합냉매(R32/R152a)를 여러 비율로 적용하여 각 비율간의 비교를 통해 사이클

에 미치는 영향을 연구하였으며, 그 결과, 혼합비율이 R32와 R152a의 비율이 87:13인 혼합냉매가 시스템효율이 가장 높은 것으로 평가되었다. 한편, Kim<sup>5)</sup>등은 원자력발전소의 온배수를 적용한 여러 종류의 OTEC 발전 시스템의 효율 비교를 통해 온배수의 사용의 합리성을 밝혔다.

그러나 실제 발전소에서 배출하는 온배수의 경우, 약 50℃의 온배수를 생산할 수 있으며 제철소 등에서는 이보다 높은 온도의 온배수가 생산가능하지만 국내의 온배수 배출 관련법규로 인해 현 배출기준(약 32℃)보다 높은 온도의 온배수 배출은 불가하며 또 이러한 온배수를 이용하는 방안이 마련되어있지 않아 에너지 이용측면에서 온배수를 이용한 발전에 관한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 혼합냉매(R32/R152a)용 OTEC 발전 사이클에 기존의 온배수보다 높은 온도의 온배수를 적용하고 일반 표층수를 적용했을 때와 비교하여 온배수가 시스템에 끼치는 영향에 대해 연구하였다.

## 2. OTEC 사이클의 장치도 및 성능분석

### 2.1 OTEC 사이클의 장치도

Fig. 1<sup>6)</sup>은 Yoon 등이 제안한 OTEC 발전 사이클의 장치도에서 표층수와 심층수에 사용되는 펌프를 각각 추가하여 나타낸 것이고, 참고문헌 [7]에는 Fig. 1의 OTEC 발전 사이클의 상태점을 P-h 선도 상에 표현했다. Fig. 1에서처럼 이 OTEC 사이클은 터빈 2개, 펌프 3개, 열교환기 4개, 기액분리기 1개, 팽창밸브 1개 등으로 구성되며, 작동유체는 R32와 R152a가 87:13의 비율인 혼합냉매를 사용한다. 증발기와 응축기 내를 순환하는 작동유체의 증발과 응축을 위해서 고온의 표층수와 저온의 심층수가 각각 사용된다.

이 OTEC 발전 사이클 내를 순환하는 작동유체의 흐름을 살펴보면, 우선 증발기에서 증발한 고온고압의 작동유체는 고단 터빈으로 들어가 중간압까지 팽창되면서 주위로 축일을 생산한 후, 재생기에서 고온의 기체인 작동유체와 저온의 액상

태인 작동유체가 열교환 한 뒤, 냉각기를 통과하면서 저온으로 냉각된다. 이렇게 냉각된 작동유체는 기액분리기에서 기상과 액상으로 분리된다. 액상은 팽창된 후, 저온저압의 작동유체로 냉각기 내의 작동유체를 냉각시킨다. 기상은 저단 터빈으로 유입되어 축일을 생산한 후, 냉각기를 통과한 작동유체와 혼합되어 응축기로 들어간다. 이때 작동유체는 저온의 심층수와 열교환하여 응축된 후, 펌프에서 가압되어 재생기를 통과해 온도가 상승한 상태에서 증발기로 유입된다.

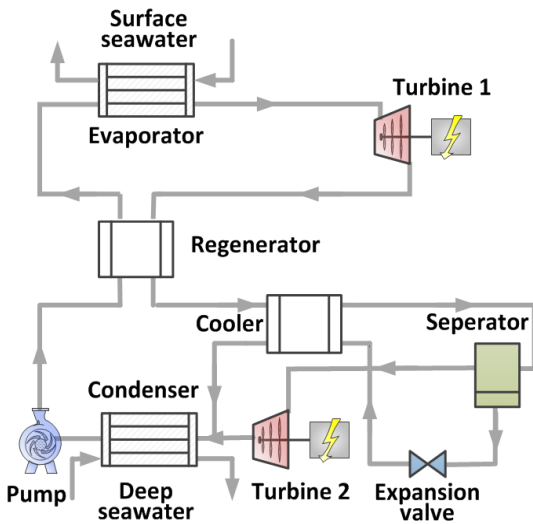


Fig. 1 Schematic of proposed OTEC power cycle

전술한 바와 같이 본 OTEC 발전 사이클의 특징은 냉각기와 기액분리기를 채용하여 응축기의 방출열량을 감소시키고, 재생기를 사용하여 증발기의 흡입열량을 줄이며, 또한 2단 터빈을 사용하여 출력일과 시스템 효율을 증가시키는 것이다.

## 2.2 OTEC 사이클의 성능분석

본 논문에서 OTEC 발전 사이클의 성능 분석은 열역학적 물성치와 상태방정식은 HYSYS<sup>®</sup> 프로그램에서 제공하는 상태방정식을 사용하였으며, 여러 가지 상태방정식 중에서 혼합냉매(R32, R152a)에 적합한 Peng-Robinson식을 이용하여 분석하였다. OTEC 발전 사이클의 효율은 순 발전량을 증

발열량으로 나눈 값으로 정의하였으며, 여기서 순 발전량은 터빈 발전량에서 펌프 소모동력을 뺀 값이다.

Table 1 Analysis range of OTEC power cycle

Refrigerant	R32/R152a (87:13)
$\Delta P_e$ , [kPa]	10
$\Delta P_c$ , [kPa]	10
$\Delta P_{HX}$ , [kPa]	10
m, [kg/h]	3600
$\eta_t$ [ / ]	0.80
$\eta_p$ [ / ]	0.65
$T_{ss,in}$ [°C]	26, 40, 54, 67, 81
$T_{ds,in}$ [°C]	5
$x_{co,out}$ [ / ]	0
$T_{ss,in} - T_{e,out}$ [°C]	2
* Reference value	

Table 1에는 본 연구에서 사용되는 OTEC 발전 시스템의 성능 분석 범위를 나타내었으며, Table 1에 기재되지 않은 냉각기 출구건도는 시스템효율이 최대가 되는 지점으로 설정하였다. 본 연구에서는 위의 분석조건으로부터 계산한 결과 값을 이용하여 온배수의 온도상승에 따라 혼합냉매(R32/R152a[87:13])을 적용한 OTEC 발전 시스템의 증발열량, 터빈 일, 펌프 일의 변화와 그에 따른 시스템효율을 분석하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 증발열량의 비교

Fig. 2은 증발기 입구로 유입되는 26°C의 표층수와 40°C, 54°C, 67°C, 81°C의 온배수를 적용할 경우, 본 연구에서 적용한 OTEC 발전 사이클의 증발기에서 발생하는 교환열량을 비교한 것이다.

증발기에 발생하는 교환 열량은 증발기로 유입되는 온배수의 온도가 상승할수록 감소하는 것을 볼 수 있으며 그 양은 일반 표층수(26°C)를 기준으

로 했을 때, 온배수의 온도 40°C, 54°C, 67°C, 81°C에서 각각 3.8%, 9.3%, 12.3%, 22.2% 감소하였다. 증발열량이 감소한 이유는 온배수 온도상승에 따라 작동유체의 증발압력이 상승했기 때문이다. 증발기로 유입되는 작동유체의 증발온도는 표층수나 온배수의 온도에 영향으로 상승하며 증발온도의 상승은 증발압력의 상승으로 볼 수 있다.

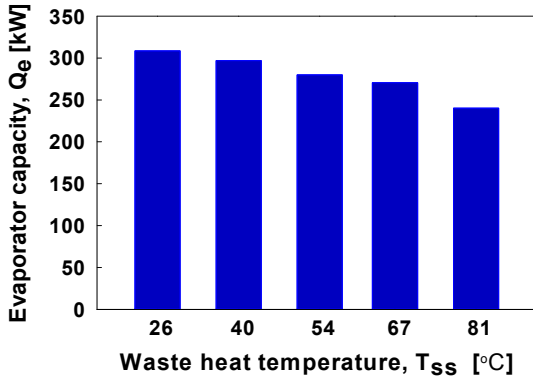


Fig. 2 Evaporator capacity of OTEC power cycle

대부분의 작동유체는 상변환에 있어서 그 압력이 높아질수록 상변화를 위한 에너지는 감소한다. Fig. 3는 작동유체 R32와 R152a의 P-H선도를 나타낸 것이다.

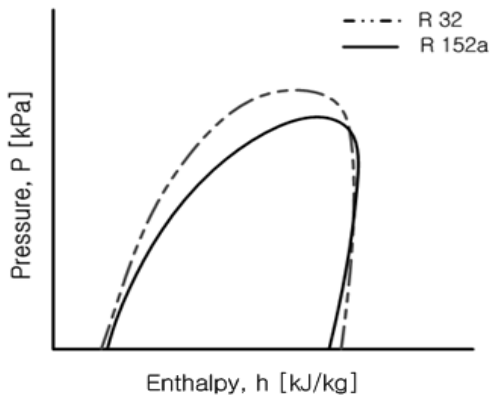


Fig. 3 P-h diagram of R32 and R152a

Fig. 3에서 나타난바와 같이 압력이 상승할수록 습증기 구간의 폭이 좁아지는 것을 볼 수 있다. 온

배수의 온도가 증가할수록 작동유체의 증발압력이 상승하여 상변화를 위한 에너지는 감소하므로 증발기에서의 교환열량이 감소한다.

### 3.2 터빈 일의 변화

Fig. 4는 온배수 온도 상승에 따른 고단터빈, 저단터빈, 전체 터빈 일의 변화를 나타낸 것이다.

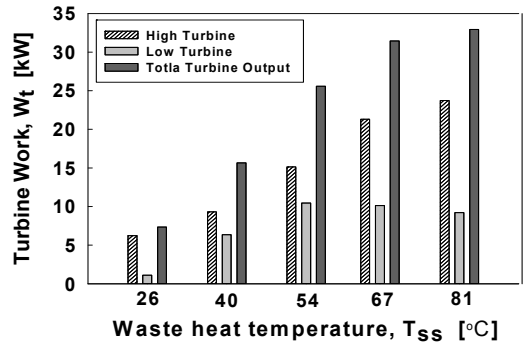


Fig. 4 Turbines works of OTEC power cycle

온배수 온도가 상승함에 따라 전체터빈 일이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 증가의 주된 원인은 고단터빈 일이 증가했기 때문이다. 반면에 저단터빈 일은 온배수 온도 54°C까지 증가한 후 소량 감소한다. 전체 일의 증가는 표층수 온도 26°C를 기준으로 하여 온배수 온도 40°C에서는 242%, 54°C에서는 348%, 67°C에서는 427%, 81°C에서는 448%로 온배수 온도 67°C까지 급상승한 후 그 상승세가 감소한다.

고단터빈의 생산일이 증가하는 이유는 고단터빈의 작동유체 출입구 엔탈피차가 증가하기 때문이다. 온배수의 온도가 상승할수록 증발온도와 압력은 크게 증가하지만 고단터빈출구의 온도와 압력은 온배수의 온도상승에 그 변화가 작기 때문에 고단터빈의 입·출구 단위질량 엔탈피 차는 증가하고 따라서 고단터빈의 생산일이 증가한다.

Fig. 4에서 저단터빈의 생산일은 표층수 26°C에서 온배수 온도 54°C까지는 증가하지만 그 이후의 온도에서는 감소한다. 이는 냉각기의 출구건도의 영향으로 인해 발생한 현상이다. 온배수의 온도가 상승할수록, 냉각기 출구건도는 낮아져 저단터빈

으로 유입되는 작동유체의 유량이 적어지기 때문에 저단터빈의 생산 일은 온배수 온도 57°C 이후로 감소하는 경향을 보인다.

### 3.3 펌프 일의 변화

Fig. 5은 온배수 온도변화에 따른 모든 펌프일과 그 합을 나타낸 것이다.

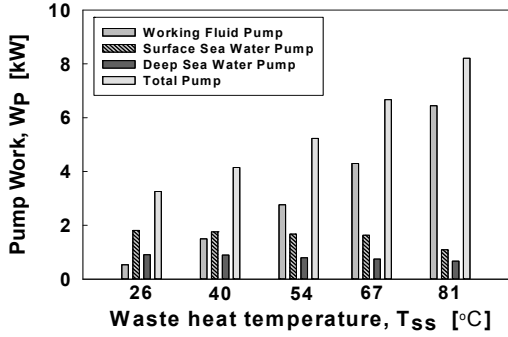


Fig. 5 Pumps works of OTEC power cycle

본 OTEC 발전 시스템에 사용되는 펌프는 작동유체 펌프와 표층수 펌프 그리고 심층수 펌프가 있다. 온배수의 온도 상승에 따라 전체 펌프일이 증가한다.

Fig. 5에서 작동유체 펌프 일은 온배수 온도가 상승할수록 그 일이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 온배수의 온도가 상승함에 따라 증발압력은 증가하지만 응축압력은 상대적으로 변화가 작기 때문에 증발압력과 응축압력의 차는 상승하여 작동유체의 펌프일은 증가한다.

표층수와 심층수 펌프는 증발기와 응축기에서 발생하는 열 교환에 필요한 해수 및 온배수를 공급하는 장치이다. 온배수의 온도가 상승함에 따라 표층수 펌프일은 감소하는데, 그 이유는 증발기 교환 열량이 감소하기 때문에 표층수 및 온배수의 필요유량도 감소하고 표층수 펌프의 소모일도 감소한다.

마찬가지로 심층수 펌프도 그 일이 감소한다. 이는 응축기로 유입되는 작동유체의 건도의 영향으로 온배수의 온도가 상승할수록 냉각기출구건도가 낮아져 응축기 입구 건도도 낮아진다. 따라서

응축열량이 감소하여 펌프일 또한 감소한다.

본 OTEC 발전 시스템에서 온배수의 온도 상승함에 따라 표층수와 심층수의 펌프일은 감소하지만 그 감소량이 작동유체 펌프일의 상승에 비하여 매우 작기 때문에 총 펌프일은 증가한다.

### 3.4 시스템 효율의 변화

Fig. 6은 온배수 온도상승에 따른 시스템효율변화를 나타낸 것이고 Fig. 7은 전체일과 증발기 교환열량을 비교하여 나타낸 것이다.

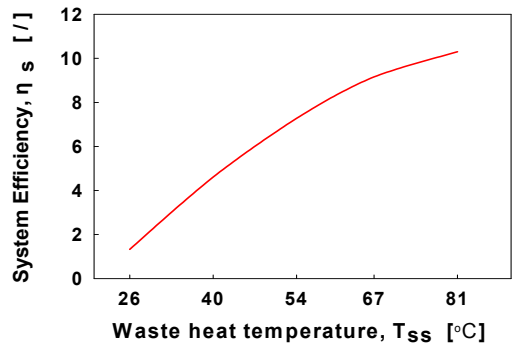


Fig. 6 System efficiency of OTEC power cycle

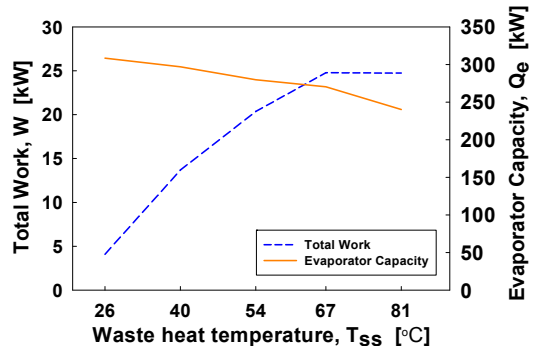


Fig. 7 Total Work and Evaporator Capacity of OTEC power cycle

Fig. 6에서와 같이 온배수의 온도가 상승함에 따라 시스템 효율은 증가한다. 일반 표층수 26°C에서의 효율이 1.33%, 온배수온도 40°C에서의 효율은 4.61%, 54°C에서 7.28%, 67°C에서 9.16%, 81°C에서 10.3%로 증가한다. 한편, Fig. 7에서 나타

난 바와 같이 전체 일은 온배수 온도 67℃와 81℃ 값의 차이가 미미함에도 시스템효율은 향상한다. 그 이유는 두 온도에서의 증발기 교환열량이 감소하기 때문에 전체 일이 같더라도 시스템효율은 온배수 온도 81℃에서 더 높은 결과를 보였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 재생기와 2단 터빈을 장착한 혼합냉매(R32/R152a[87:13])의 OTEC 발전 시스템에서 일반 표층수와 그보다 높은 온도의 온배수를 적용하여 시스템의 변화를 비교하였다.

본 OTEC 발전 사이클에서 시스템 효율에 영향을 끼치는 요소는 증발기 교환열량, 터빈 일, 펌프 일로 온배수의 온도 상승으로 증발기 교환열량은 감소하고 터빈 일과 펌프 일은 증가 하였다.

전체 일은 온배수 온도 67℃와 81℃가 유사 값을 보이지만 시스템효율은 증발기의 교환열량 감소로 인해 81℃에서의 효율이 더 높았다. 이는 전체 일이 증가하지 않는 경우라도 증발기 교환열량을 감소하면 시스템효율 향상이 가능하며 온배수 온도 상승으로 인해서 효율상승과 증발기 용량축소가 가능하다는 것을 뜻한다. 따라서 OTEC 발전 사이클의 효율 향상을 위해서는 고온의 배수를 OTEC 발전 사이클에 적용할 필요가 있다. 또 본 연구에서 적용한 작동유체만 아니라 다른 가능성 있는 작동유체에도 온배수 사용에 따른 변화가 있을 것으로 사료되며 온배수를 적용한 OTEC 발전 사이클에 적합한 작동유체에 대한 연구가 필요하다고 판단한다.

#### 후 기

본 연구는 국토해양부가 지원하는 ‘해양심층수의 에너지 이용 기술 개발’결과임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

#### References

1. K. Y. Hong, B. S. Hyun, 2010, “Current Situation

of Technique and Prospect of Ocean energy”, Magazine of the SAPEK, Vol. 39, No. 1, pp. 13-20.

2. H. S. Lee, H. J. Kim, D. H. Jung, D. S. Moon, 2011, "A Study on the Improvement for Cycle Efficiency of Closed-type OTEC", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 35, No. 1, pp. 46-52.

3. H. S. Lee, H. J. Kim, D. G. Kang, D. S. Jung, 2012. “Thermodynamic performance of R32 /R152a mixture for water source heat pumps”, Elsevier, Vol. 40, Issue 1, pp. 100-106.

4. J. I. Yoon, C. H. Son, S. M. Baek, D. I. Yang, B. H. Ye, J. H. Heo, 2013, "Exergy Analysis of R744 OTEC Power Cycle with outlet pressure of evaporator and expansion valve", Journal of Joint Academic of the Korean Society for Power System Engineering, pp. 21-22.

5. N. J. Kim, Y. H. Jeon, C. B. Kim, 2007, "Cycle Simulation on OTEC System using the Condenser Effluent from Nuclear Power Plant", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 27, No. 3, pp. 37-44.

6. J. I. Yoon, C. H. Son, K. H. Choi, J. H. Heo, H. U. Kim, D. I. Yang, 2013, "Performance Characteristics of a R744 OTEC Power System Using High Temperature Heat Source", Journal of Joint Academic of the Korean Society of Marine Engineering, pp. 266-267.

7. HYSYS V\_8.0 AspenTech. Inc.