

# MW급 개방형 온도차발전과 폐쇄형 온도차발전의 해수온도변화에 따른 발전특성 성능비교 시뮬레이션

임승택<sup>1</sup> · 이호생<sup>2</sup> · 김현주<sup>†</sup>

(Received April 30, 2019 ; Revised July 4, 2019 ; Accepted July 17, 2019)

## Simulation of power generation performance of MW-class open- and closed-cycle OTEC systems based on seawater temperature change

Seung-Taek Lim<sup>1</sup> · Ho-Seang Lee<sup>2</sup> · Hyeon-Ju Kim<sup>†</sup>

**요약:** 지속적인 환경문제와 신재생에너지 대체 문제를 해결하기 위한 수단으로 무한에 가까운 청정 해양에너지를 이용한 해수온도차발전의 발전 특성에 대하여 연구하였다. 현재 개발 중인 개방형과 폐쇄형 온도차발전의 시뮬레이션을 통해 발전량과 담수 생산량을 비교하였으며, 다양한 해수 온도조건을 적용하여 해수 온도 변화에 따른 발전 사이클의 적용 특성을 비교 하였다. 개방형의 경우 소모 전력이 폐쇄형에 비교하여 높게 나타났으며, 26℃의 열원 조건에서 개방형과 폐쇄형의 전력차이가 약 24kW 발생하는 것을 확인 되었다. 30℃의 고온 열원 조건의 지역에서는 폐쇄형 발전 사이클의 적용이 최대 92kW 높은 총 출력을 나타내었으며, 순수 출력의 경우 개방형 온도차 발전이 1단과 2단 증발 방식에서 각각 217.5kW와 291.8kW 낮게 나타났다. 2단 증발의 이중 담수화를 통해 최대 45,400 kg/h의 담수량 증가를 보였으나, 전력 소비의 증가로 74.7kW의 발전 출력 감소를 보였다. 개방형 온도차발전 사이클은 열원 조건에 따라 최대 128,420 kg/h의 담수 생산량을 보여 전력과 담수의 이중 수요지의 적용성이 우수한 것으로 판단된다.

**주제어:** 해수온도차발전, 개방형, 폐쇄형, 해수담수화

**Abstract:** In this study, the performance of the developmental characteristics of a 1-MW ocean thermal energy conversion (OTEC) system was investigated using infinite clean ocean energy in order to solve sustainable environmental problems and replacement of renewable energy. Simulations of open and closed OTEC systems under development were compared based on power generation and fresh water production. The application characteristics of the OTEC cycle according to seawater temperature distribution were compared by applying various seawater temperature conditions. Results showed that the power used in the open type was higher than that in the closed type. Under conditions of a heat source at 26 °C, open and closed power differences were found to be approximately 24 kW. In areas with high-temperature heat-source conditions of 30 °C, the application of closed OTEC cycles was shown to be up to 92-kW total power. For net power, the generation of the open-type OTEC cycle was as low as 217.5 kW and 291.8 kW in the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> evaporation methods, respectively. Despite the increase in fresh water up to 45,400 kg/h through dual desalination of two-stage evaporation, as the power consumption increased, the power generation output decreased by 74.4 kW. The open-type OTEC was 123.8 kW higher at a 30 °C heat-source condition. The open-type OTEC cycle can produce up to 128,420 kg/h of fresh water depending on the heat-source conditions and is applicable to locations having the dual demands of power and fresh water.

**Keywords:** Ocean thermal energy conversion, Open cycle, Closed cycle, Seawater desalination

## 1. 서 론

해수온도차에너지는 약 300 EJ/year로 추정되며, 또한 세

계 해양의 90 %에서 에너지 잠재력을 가지고 있는 것으로 추정되고 있다. 해수온도차에너지는 다른 해양 에너지와 비

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4986-8914>): Principal Researcher, Offshore Plant Research Department, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 32, Yuseong-daero 1312beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea, E-mail: [hyeonju@kriso.re.kr](mailto:hyeonju@kriso.re.kr), Tel: 042-866-3700

1 Researcher, Seawater Energy Plant Research Center (SEPRC), Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: [limst@kriso.re.kr](mailto:limst@kriso.re.kr), Tel: 033-630-5023

2 Principal Researcher, Seawater Energy Plant Research Center (SEPRC), Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: [hslee@kriso.re.kr](mailto:hslee@kriso.re.kr), Tel: 033-630-5021

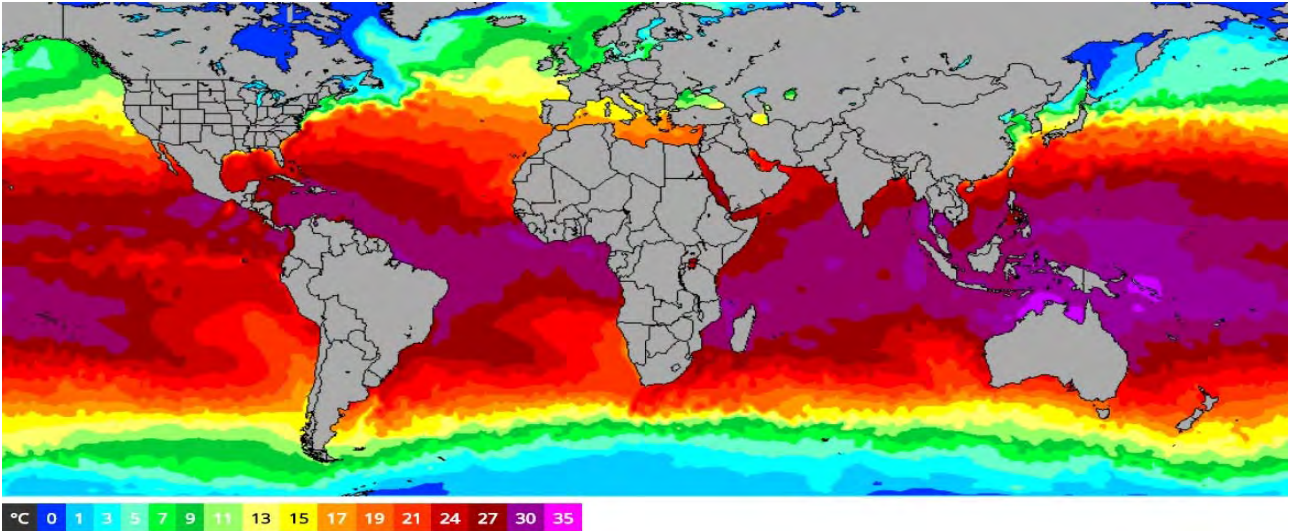


Figure 1: Distribution of world surface sea temperature [3]

교하여 가장 큰 잠재력을 가지고 있는 기술에 속한다[1]. 또한, 해수온도차에너지의 잠재량은 Figure 1에서와 같이 세계적으로 넓게 퍼져 있어 최소 98개의 국가에서 경제성을 가지고 있다[2]. 하와이대학의 Luis vega교수에 따르면 아프리카와 인도 해안, 미 대륙의 열대 서부 및 남동부 해안 및 많은 카리브 해 연안과 태평양 섬은 해수면 온도가 25°C~30°C라고 보고하였다[4]. 이처럼 세계적인 에너지 부족을 해결하기 위하여 해수 열을 이용하는 온도차발전에 대한 관심과 연구가 진행되고 있다. 근래 온도차 발전과 관련된 연구는 시스템 성능 향상에 관한 연구로서 국내에서는 이젝터와 이젝터-펌프를 적용 터빈 출구 압력을 낮추는 원리를 이용하여 터빈 출력을 증가하는 방식을 연구하였으며, 최대 4.0%의 시스템 효율을 나타내어 기존 방식과 비교하면 최대 38%의 출력 증가를 보였다[5]. Jung 등은 사이클 개발을 위해 30°C의 열원과 5°C의 냉열 조건에서의 폐쇄형 해양 온도차발전 사이클 효율 향상 방안에 관한 연구를 진행하였으며, 2단 터빈을 적용한 사이클에서는 기존효율(3.1%)대비 3.3%까지 상승하는 것을 확인하였다[6]. Nguyen Van Hap 등은 태양열 이용 해양온도차발전시스템의 성능을 예측하여 Solar-boosted OTEC의 시간별(24시간), 월별 사이클 효율에 대해 해석을 하였으며, 하루 중 가장 높을 때 12%에서 가장 낮을 때 2% 이하의 효율을 나타내었다. 이때, 월평균 효율은 5.8~6.75%를 확인할 수 있었다[7]. 또한, Yoon 등은 작동 유체의 성능에 따른 폐쇄형 온도차발전 성능을 비교하였다 [8]. 이와 같은 연구는 폐쇄형 사이클(Closed cycle)의 성능향상과 사이클 개선에 집중되어 있으며, 상대적으로 낮은 발전 효율을 보이는 개방형 사이클(Open cycle)과 초기 투자비용이 높은 복합 사이클(Hybrid cycle)의 연구는 부족한 실정이다. 그러나 지속되는 물 부족과 식수 요구에 의하여 담수화에 관한 연구가 가속화되면서 에너지와 담수를 함께 생산 가능한 Open cycle Ocean thermal energy conversion (OC-OTEC)에 대한 관심이 증가하고 있다. 최근 하와이 대

학에서 보고된 80MW급 OC-OTEC과 CC-OTEC과의 성능 비교에서는 전기 및 담수 생산량에서 CC-OTEC의 경우 432,609 MWh/y이며, OC-OTEC의 경우 414,415 MWh/y 및 118,434 m<sup>3</sup>/day를 나타내었다. 전력량에서 약 4.2%의 차이를 나타내었으나 담수 생산량을 금액으로 전환하면 그 가치가 더 높을 것으로 보고하였다[9]. 또한 Kim 등은 Matrab을 통한 1MW급 OC-OTEC의 시뮬레이션을 통하여 최대 16.93kg/s의 담수생산을 도출함으로써 개방형 온도차발전 사이클의 담수 생산량을 확인하였다[10].

본 논문을 통하여 동일 해수 조건의 CC-OTEC과 OC-OTEC과의 성능을 비교 하였으며, 2단 진공챔버를 통한 2중 담수화 방식을 적용하여 발전 출력과 담수 생산량을 비교하였다. 또한, 지역의 담수 및 전력 단가에 따른 해수 온도차발전 방식의 경제성 비교를 위한 기초 연구로서 온도차발전에서 생산된 전력과 담수량을 비교하였다.

## 2. 해수온도차발전 원리

### 2.1 개방형 온도차발전 사이클

#### 2.1.1 1단 증발 개방형 온도차발전

1단 증발 개방형 온도차발전(1st stage OC-OTEC)은 증발 챔버 내로 유입된 표층 해수가 진공펌프에 의해 저압으로 감압 되며, 상온에서 증발하게 된다. 증발된 수증기가 터빈을 통과하여 발전하게 되며, 터빈을 통과한 습증기는 응축기를 통하여 증류수로 응축된다. 증기 응축을 위한 열침으로는 수심 700m 이하에서 4~6°C의 저온 심층수를 사용한다. 응축기에서 상변화된 증류수는 담수챔버에 저장되며, 챔버는 진공펌프에 의해 저압을 형성한다. 이때, 담수는 펌프를 이용하여 배출된다. 개방형 온도차발전의 증발 열량은 식 (1)과 같으며, 응축 열량은 식 (2)와 같다. 또한 저압 증기 터빈의 출력은 식 (3)과 같이 구하며, 식 (4)는 증기 발생량을 나타낸다.

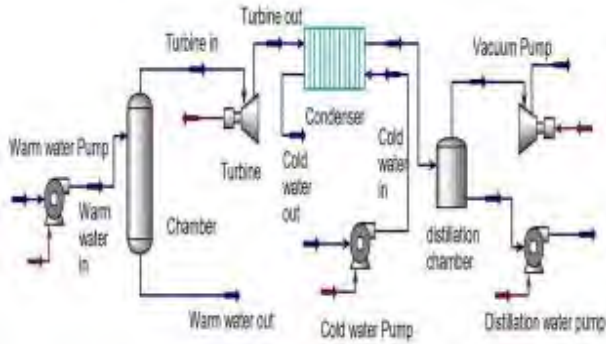


Figure 2: schematics of 1<sup>st</sup> stage Open cycle OTEC

$$Q_w = \dot{m}_{ww} C_p (T_{wwi} - T_{wwo}) \quad (1)$$

$$Q_c = \dot{m}_{cw} C_p (T_{cwi} - T_{cwo}) \quad (2)$$

$$W_t = \dot{m}_s (h_{ti} - h_{to}) = \dot{m}_s \eta_t (h_{ti} - h_{tos}) \quad (3)$$

$$\dot{m}_s = Q_w / (h_{ti} - h_{wwo}) = Q_c / \chi (h_{to} - h_{co}) \quad (4)$$

여기서,  $\dot{m}_{ww}$  와  $\dot{m}_{cw}$  는 각각 표층수와 심층수의 질량 유량,  $C_p$  는 비열,  $T_{wwi}$  와  $T_{wwo}$  는 표층해수 그리고  $T_{cwi}$  와  $T_{cwo}$  는 심층해수의 열교환기 입구와 출구에서의 온도를 나타낸다. 또한,  $\dot{m}_s$  는 증기유량을 나타내며,  $\eta_t$  는 터빈효율,  $h_{ti}$  와  $h_{to}$  는 각각 이론적 터빈 입구와 출구의 엔탈피를 나타내며  $h_{tos}$  는 실제 터빈 효율을 적용한 출구에서의 엔탈피이며,  $h_{wwo}$  는 배출 해수의 엔탈피를 나타낸다. 증발되는 증기는 해수와 발생증기와의 증발열량 관계식을 통해 증기량을 계산한다.

개방형 온도차발전의 표층해수 열원은 증기의 증발잠열로 100% 공급하는 것을 가정하였으며, 증기발생량은 터빈 출구의 건도  $\chi$  와 응축기 입-출구 엔탈피  $h$  와  $h_{co}$  의 차이에 의해서도 계산된다.

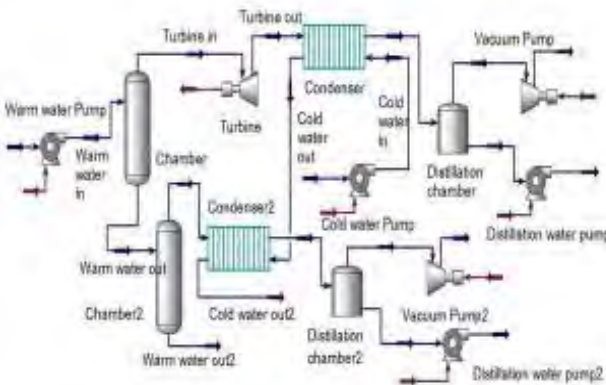


Figure 3: Schematics of 2<sup>nd</sup> stage Open cycle OTEC

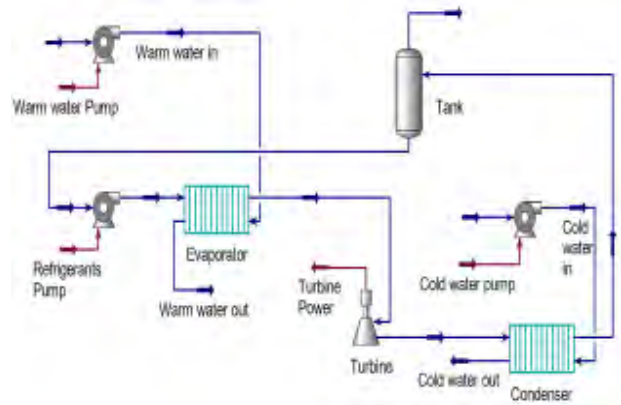


Figure 4: schematics of Closed cycle OTEC

온도차발전의 순수효율은 식 (5)와 같이 발생전력량과 증발열량과의 비로 구하며, 이때 순수 전력량은 식 (6)과 같이 터빈전력량과 사용전력의 차로 구한다.

$$\eta_{net} = \frac{W_{net}}{Q_w} \quad (5)$$

$$W_{\neq t} = W_t - W_{wvp} - W_{cwp} - W_{dwp} - W_{vp} \quad (6)$$

여기서  $W_t$  는 터빈의 발전량을 나타내며,  $W_{wvp}$ ,  $W_{cwp}$ ,  $W_{dwp}$ ,  $W_{vp}$  는 각각 개방형 온도차발전의 필요 동력인 표층수 펌프, 심층수 펌프, 담수 펌프, 진공 펌프를 나타낸다. 1 단 증발 개방형 온도차발전의 구성은 Figure 2와 같다.

### 2.1.2 2단 증발 개방형 온도차발전

2단 증발 개방형 온도차발전(2nd stage OC-OTEC)은 1단 증발과 발전 방식이 동일하다. 하지만 1단 진공챔버에서 배출된 표층수가 2차 감압되어 증발이 발생하며, 발생한 증기는 터빈을 통과하지 않고 2차 응축기에서 응축되어 2차 담수챔버에 저장된다. 2단 증발의 경우 일반적으로 진공 압력이 낮아 터빈의 압력차 발생이 적어 발전은 하지 않으며, 증발 후 담수 생산을 목적으로 한다. 저장된 담수는 담수 펌프2에 의해 이송되며, 진공 챔버2와 담수 챔버2는 진공펌프2에 의해 감압된다. 2단 증발 개방형 온도차발전의 담수 생산량은 식 (7)과 같으며, 순수 출력은 식 (8)과 같다. 2단 증발 개방형 온도차발전의 구성은 Figure 3과 같다.

$$\dot{m}_s = Q_{w1}/h_{fg1} + Q_{w2}/h_{fg2} \quad (7)$$

$$W_{\neq t} = W_t - W_{wvp} - W_{cwp} - W_{dwp1} - W_{vp1} - W_{dwp2} - W_{vp2} \quad (8)$$

여기서  $Q_{w1}$  와  $Q_{w2}$  는 1단 증발열량과 2단 증발열량을 나타내며,  $h_{fg1}$  와  $h_{fg2}$  는 1단 증발 이후의 엔탈피량과 2단 증발 이후의 엔탈피량을 나타낸다. 또한, 순수출력을 구하기 위

한 필요 동력을 계산하는 과정에서  $W_{dwp2}$ 와  $W_{vp2}$ 의 추가 필요전력이 소요된다.

### 2.2 폐쇄형 온도차발전 사이클

폐쇄형 온도차발전(CC-OTEC)은 개방형과 달리 작동 유체(Working Fluids)를 터빈에 통과시켜 발전하며, 표층수와 심층수의 온도차를 이용한다. 표층수에 의해 증발된 작동 유체는 고온, 고압의 상태로 터빈을 통과하며, 이후 감압되어 심층수에 의해 저온 액체로 응축 된다. 이 사이클은 작동 유체 펌프에 의해 순환된다. 폐쇄형 발전의 터빈 출력은 식 (9)와 같으며, 순수 발전량은 식 (10)과 같다.

$$W_t = \dot{m}_r(h_{ti} - h_{to}) = \dot{m}_r \eta_t (h_{ti} - h_{tos}) \quad (9)$$

$$W_{\neq t} = W_t - W_{wvp} - W_{cwp} - W_{rp} \quad (10)$$

여기서  $m_r$ 는 냉매의 질량 유량을 나타내며,  $W_{rp}$ 는 작동 유체의 순환 펌프 동력을 나타낸다. 폐쇄형 온도차발전은 개방형과 비교하여 전력 효율이 높고 터빈의 소형화가 가능하며, 대형 온도차발전과 해상형 온도차 발전을 구성하기에 적합하다. 폐쇄형 온도차발전의 구성은 Figure 4와 같다[11].

## 3. 해수온도차발전 사이클 설계

### 3.1 MW급 온도차발전 사이클 설계

개방형과 폐쇄형 온도차발전에 다양한 표층 해수 온도 조건에서의 발전 성능을 비교하기 위하여 26°C에서 30°C까지의 해수온도차분포 맵의 지역별 표층 온도 조건을 1°C의 차이를 적용하여 설계에 반영하였다. 심층수 온도는 4~6°C로 지역별 차이가 작으므로 본 논문에서는 5°C의 평균 심층수 온도를 적용하였다. 이때, 표층수 유량은 1,948kg/s로 설계하였으며, 해수 펌프의 효율과 터빈의 효율은 각각 75%와 80%를 적용하여 설계하였다[12].

표층수와 심층수에서 발생하는 손실 수두는 육상형 라이저와 열교환기, 감압 챔버, 피팅 등의 다양한 요인으로 발생하며, 개방형과 폐쇄형과의 손실 수두는 표층 해수에서 5.5m, 심층해수에서 8.2m로 동일하게 설계하였다. 온도차 발전의 손실 수두는 현재 선박해양플랜트연구소에 개발 중인 폐쇄형 온도차발전 실시설계 수두 조건을 적용하였다. 식 (11)은 총 손실 수두 발생에 관한 계산식으로서 개방형과 폐쇄형은 증발 방식에 따른 Static loss와 Dynamic loss의 차이가 다소 발생하나 동일 발전 성능을 비교하기 위하여 본 논문에서는 고려하지 않았다. 시뮬레이션 해석 방법으로는 기본적인 유기랭킨사이클을 해석하기 위해 공정설계 프로그램인 AspenTech HYSYS(V8.8)을 사용하였다.

#### 3.1.1 개방형 온도차발전 사이클 설계

표층 해수를 작동 유체로 사용하는 개방형 온도차발전은 진공 챔버의 압력에 따라 발생하는 증기량과 발전량에 영

$$\begin{aligned} \Sigma Total\ headloss & \quad (11) \\ & = Staticloss + dynamicloss + \\ & \quad pipe\ headloss + trech\ headloss \\ & \quad Supplypipe\ headloss \end{aligned}$$

향을 미친다. 진공 챔버의 압력은 3 kPa 이하에서 1MW급 발전할 수 있으며, 챔버의 압력은 2.62 kPa과 터빈을 통과 후의 압력은 1.38 kPa로 온도 변화와 관계없이 설계하였다. 이후 2단 진공 챔버의 압력은 0.6 kPa의 압력 강하가 발생한 2.02 kPa으로 가정하였으며, 1단과 2단에 사용된 진공펌프의 효율은 90%를 가정하였다[13].

#### 3.1.2 폐쇄형 온도차발전 사이클 설계

폐쇄형의 경우 표층수와 심층수가 각각 열원과 열침에 역할함을 하게 되며, 사이클은 작동 유체에 의해서 순환된다. 폐쇄형 해수온도차발전에 적용을 위한 작동 유체에 관한 연구는 다양하게 적용되었으나, 본 연구에는 순수 유체로서 발전 성능이 높고 열교환기와 터빈의 소형화가 가능한 R32를 적용하여 사이클을 설계하였다[14][15].

증발기를 통과한 작동 유체의 과열도 발생은 0°C이며, 증발기와 응축기의 핀치 온도(Pinch temperature)는 1.5°C의 기본 설계 값을 적용하였고 해수 온도변화에 따라 증발압력은 핀치온도를 유지하도록 설계하였다. 온도차발전 사이클 구성에 대한 자세한 설명은 Table 1과 같다.

Table 1: Specifications for OC/CC OTEC Cycle

Design Conditions		
Warm water temperature	26, 27, 28, 29, 30	°C
Cold water temperature	5	°C
Warm water flow rate	1,948	kg/s
Warm water head loss	5.5	m
Cold water head loss	8.2	m
Warm water pump efficiency	75	%
Cold water pump efficiency	75	%
Turbine efficiency	80	%
Temperature change in condenser	5	°C
OC OTEC		
Vacuum chamber pressure	2.62	kPa
2 <sup>nd</sup> stage vacuum chamber pressure	2.02	kPa
Turbine out pressure	1.38	kPa
Vacuum pump efficiency	90	%
Condenser out vapor fraction	0.01	
CC OTEC		
Heat exchanger pinch temperature	1.5	°C
Super heat	0	°C
Working fluid	R32	
Working fluid pump efficiency	75	%

### 4. 시뮬레이션 결과

#### 4.1 진공압력에 따른 개방형 발전 증기 발생량

진공챔버의 진공압력 변화와 증기 발생은 서로 반비례하며, 진공펌프의 용량과 해수 온도에 영향을 받아 진공챔버의 압력이 변화된다. 26℃ 열원의 1MW급 개방형 온도차발전 사이클에서 진공압력 변화에 따른 증기 발생량은 Figure 5와 같다.

#### 4.2 해수온도차발전 총 출력

해수 온도 변화에 따른 개방형과 폐쇄형 온도차발전의 출력 변화는 26℃의 온도조건에서 각각 745kW와 769.4kW를 나타내어 폐쇄형 발전에 출력이 24.4kW 높은 것을 확인하였다. 또한, 30℃의 최대 열원 조건에서는 개방형과 폐쇄형 각각 1,578kW와 1,670kW를 보여 폐쇄형 발전에서 약 66kW 가량 출력 증가량이 높은 것을 확인하였다. 온도변화와 발전량과의 관계는 Figure 6과 같이 나타난다.

#### 4.3 해수온도차발전 전력 소모량

개방형 온도차발전과 폐쇄형 온도차발전과의 자체 전력 소모량을 비교하면 전 열원에서 폐쇄형 온도차발전의 소모 전력이 낮게 나타났다. 온도 변화에 따른 전력량 증가율도 폐쇄형의 경우 26℃ 대비 30℃에서 최대 63.77%의 증가율을 보였으나, 개방형의 경우 1단 증발은 68.41%와 2단 증발의 경우 56.75%의 증가율을 나타내었다. 2단 증발 개방형 온도차발전의 경우 30℃의 열원 조건에서 최대 693.99kW의 전력 소모량을 보여 생산 전력의 43.98%의 소모량을 나타내었다. 발전 방식과 온도변화에 따른 전력 소모량 변화는 Table 2와 같이 나타난다.

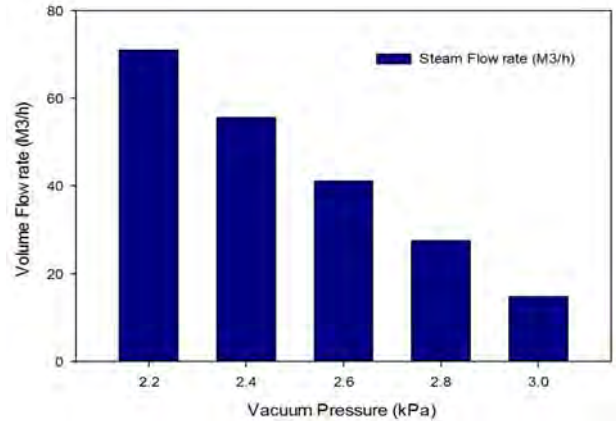


Figure 5: Volume flow rate of Vacuum chamber according to the vacuum pressure

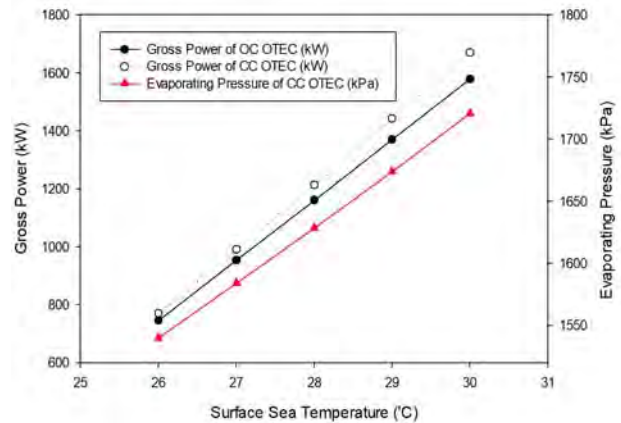


Figure 6: Gross power changes according to Surface sea Temperature

Table 2: Power Consumptions of OC/CC OTEC Cycle

Surface sea Temp'(°C)	26	27	28	29	30
1st OC-OTEC Power Consumption					
Warm water pump	142.8	142.8	142.9	142.9	143
Cold water pump	147.6	188.8	230.1	271	312.5
Fresh water pump	1.58	2.02	2.462	2.9	3.34
Vacuum pump	75.96	97.2	118.4	139.6	160.8
Total (kW)	367.94	430.82	493.862	556.4	619.64
2nd OC-OTEC Power Consumption					
Warm water pump	142.8	142.8	142.9	142.9	143
Cold water pump	147.6	188.8	230	271.3	312.5
Fresh water pump 1	1.58	2.02	2.46	2.9	3.34
Fresh water pump 2	1.83	1.83	1.83	1.82	1.82
Vacuum pump 1	75.92	97.19	118.4	139.6	160.8
Vacuum pump 2	73.02	72.9	72.77	72.65	72.53
Total (kW)	442.75	505.54	568.36	631.17	693.99
CC-OTEC Power Consumption					
Warm water pump	143.3	143.3	143.4	143.4	143.4
Cold water pump	147.6	188.8	230.1	271	312.5
Working fluid pump	42.52	54.43	66.34	78.24	90.15
Total (kW)	333.42	386.53	439.84	492.64	546.05

#### 4.4 순수 출력 및 담수 생산량

개방형과 폐쇄형 온도차발전의 순수 출력은 총 터빈발전량과 전력 소모량과의 차로 정한다. 26℃의 상대적 저온열원의 경우 총 출력량이 높고 전력 소모량이 적은 폐쇄형 온도차발전에서 435kW의 높은 순수 출력량을 나타내었으며, 30℃의 열원 조건에서는 개방형방식과 폐쇄형방식의 순수 출력량의 차가 증가하여 165.6kW 차이를 보였다. 반면 2단 증발 개방형의 경우 30℃ 열원 조건에서 진공펌프와 담수 순환 펌프의 전력 소모량의 증가로 순수 출력이 폐쇄형보다 239.9kW 낮게 나타났으며, 온도변화에 따른 평균 출력 증가량은 폐쇄형에서 280.98kW, 개방형에서 1단과 2단에 각각 239.62kW와 221kW를 보여 폐쇄형이 최대 17.2%의 출력 차이를 보였다. 온도변화와 순수 발전량과의 관계는 Figure 7과 같이 나타난다.

또한, 온도 변화에 따른 개방형 온도차 발전의 담수 생산량은 1단 증발의 경우 30℃의 열원 조건에서 최대 83,020kg/h의 생산량을 보였으며, 2단 증발의 경우 동일 온도에서 128,420 kg/h의 생산량을 보였다. 2단 증발의 온도 변화에 따른 생산량의 변동은 1단과 비교하여 차이가 유사하며 온도 상승과 비례하여 생산량 증가를 보였다. 온도 변화에 따른 담수생산량은 Figure 8과 같다.

#### 4.5 시스템 효율 및 순수 효율

시스템 효율은 유입열량대비 총 출력의 비를 말하며, 순수 효율은 유입열량대비 순수 출력의 비를 의미한다. Figure 9와 같이 개방형 온도차발전의 경우 최대 2.59%의 시스템 효율을 보이며 진공 압력에서 표층수 온도가 상승함에 따라 증발열량이 증가하나 터빈 출력 증가량과 정비례하므로 온도에 따른 효율 변화가 거의 없다. 폐쇄형 온도차발전 또한 표층수 온도 상승과 함께 증발열량이 29,078kW에서 61,647kW로 증가하며, 개방형보다 터빈 출력 증가 폭이 435.1kW에서 1,123.9kW로 높아 2.65%에서 2.71%로 상승하게 되고, 이는 기존대비 약 2.4% 상승률을 보인다.

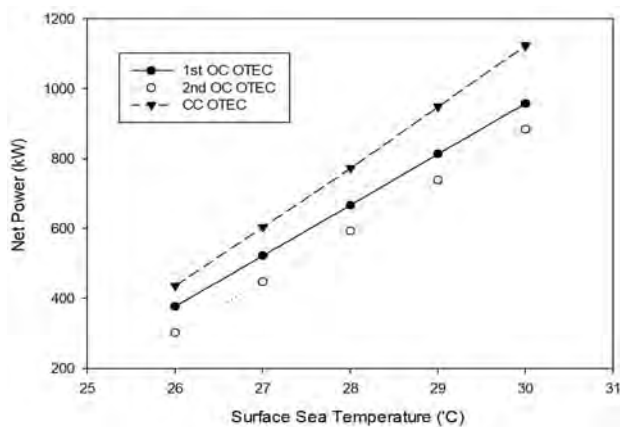


Figure 7: Net power changes according to Surface sea Temperature

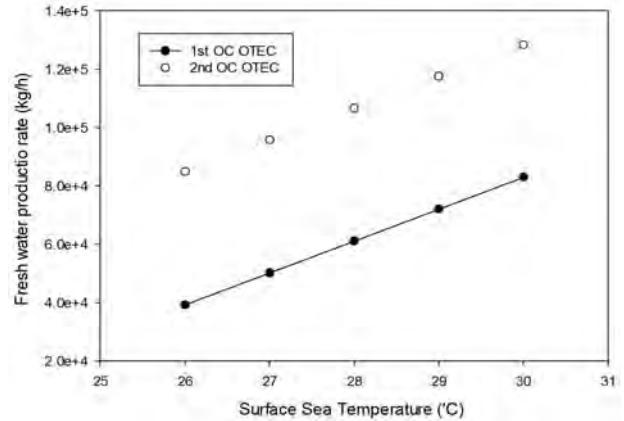


Figure 8: Fresh water product rates according to Surface sea Temperature

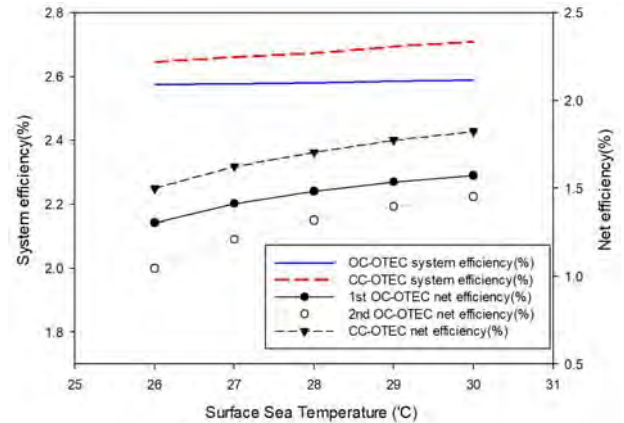


Figure 9: System and Net efficiency of OC/CC OTEC

순수 효율은 최저 1.30%에서 최대 1.57%로 0.27%의 상승을 보이나 증발열량이 상승하면서 응축 열량과 공급 심층수 유량이 증가하고 펌프의 소비 전력이 증가하면서 효율 증가율이 감소한다. 2단 증발의 경우 시스템 효율은 동일하나 순수 효율의 경우 최소 1.04%에서 최대 1.45%로 0.41%의 감소량이 발생하여 1단과 비교하여 효율 감소량이 큰 것으로 나타났다. 반면 폐쇄형발전의 경우 터빈 출력 증가량보다 소요 동력의 증가량이 적어 순수 효율이 1.50%에서 1.82%로 최대 20.4%까지 상승하게 된다.

## 5. 결론

본 논문을 통하여 MW급 규모의 해수온도차발전 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 또한, 개방형과 폐쇄형 사이클 간의 발전 성능을 비교하였으며, 해수 온도변화에 따른 성능 변화를 비교하였다.

- (1) 폐쇄형 온도차발전의 경우 26℃의 저온 표층 해수 조건에서 발전량이 개방형에 비교하여 유사하게 나타나며, 온도가 증가할수록 발전량의 차이가 커져 30℃의 열원에서 최대 92kW의 차이를 확인하였다. 해수온도차발전

- 을 적용하는 지역의 표층 해수 조건이 높은 경우 폐쇄형 발전 사이클 적용에 따른 발전 출력 증가가 예상된다.
- (2) 개방형의 경우 발전 출력은 폐쇄형보다 낮으며 2단 증발 온도차발전에서 진공펌프의 출력이 발전 손실로 작용하여 전력생산 측면에서 가장 낮게 나타나고 있다. 하지만 해수 온도 상승에 따른 순수 출력 증가율이 38.8%로 높아 고온 해수에 적용할 경우 발전 이익 상승률이 높다는 것을 확인하였다.
  - (3) 개방형 온도차발전의 담수 변화에 따른 전력량과 담수 생산량의 변화는 2단 증발 개방형 발전에서 평균 74.7kW의 순수출력 감소를 나타내었으나, 담수 생산량은 2단 증발을 통해 약 45,400 kg/h의 증가량을 보였다. 이와 같은 담수의 기술은 물 부족 국가에 대한 기술로서 활용 가능할 것으로 예상된다.
  - (4) 폐쇄형 발전 방식은 온도 상승에 따라 출력 상승이 높으며, 시스템 효율과 순수 효율이 개방형보다 높게 나타난다. 하지만 개방형 발전에서 발생하는 담수는 지역에 따라 높은 경제성을 가지고 있어 이를 비교하여 온도차발전방식을 결정할 필요가 있다. 본 논문을 바탕으로 온도차발전 예상 적용지의 표층 온도 조건과 발전 및 담수 생산 단가 적용을 통한 해수온도차 발전플랜트의 설계가 수반되어야 할 것으로 예상된다.

## 후 기

본 논문은 해양수산부의 국가 R&D 사업인 “1MW급 해수온도차발전 실증플랜트 개발(4/5)”(PMS4080)에 의해 수행되었습니다.

## Author Contributions

Conceptualization, S. T. Lim and H. J. Kim; Methodology, S. T. Lim; Software, S. T. Lim; Validation, S. T. Lim and H. J. Kim; Formal Analysis, S. T. Lim; Data Curation, H. S. Lee; Writing-Original Draft Preparation, H. S. Lee; Writing-Review & Editing, Visualization, S. T. Lim; Supervision, H. J. Kim; Project Administration, H. J. Kim; Funding Acquisition H. J. Kim.

## References

- [1] A. Lewis and E. Segen, “Ocean Energy”, IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Cambridge University, Cambridge and New York, 2011.
- [2] R. Kempener and F. Neumann, “Ocean Thermal Energy Conversion Technology Brief,” IRENA Ocean Energy Technology Brief 1, IRENA, Germany, 2014.
- [3] World Sea Temperatures, [www.seatemperature.org](http://www.seatemperature.org), Accessed May 7, 2019.
- [4] L. A. Vega, “Ocean Thermal Energy Conversion,” In: Meyers R.A. (eds) Encyclopedia of Sustainability Science

and Technology. Springer, New York, NY, 2012.

- [5] 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*, vol. 105, pp. 366-373, 2017.
- [6] D. H. Jung, H. S. Lee, H. J. Kim, and D. S. Moon, “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, 2011 (in Korean).
- [7] V. H. Nguyen and G. S. Lee, “Performance investigation of solar-heating ocean thermal energy conversion (SH-OTEC) in Korea,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, vol. 37, no. 1 pp 43-49, 2013.
- [8] J. I. Yoon, C. H. Son, S. M. Baek, H. J. Kim, and H. S. Lee, “Efficiency comparison of subcritical OTEC power cycle using various working fluids,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 7, pp. 985-996, 2014.
- [9] L. A. Vega, “Economics of ocean thermal energy conversion (OTEC): An update,” *Offshore Technology Conference*, 2010 (in USA). [Online]. Available: <http://hinmrec.hnei.hawaii.edu/wp-content/uploads/2010/01/OTEC-Economics-2010.pdf>
- [10] A. S. Kim, H. J. Kim, H. S. Lee, and S. W. Cha, “Dual-use open cycle ocean thermal energy conversion (OC-OTEC) using multiple condensers for adjustable power generation and seawater desalination,” *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 344-358, 2016.
- [11] J. P. Navani and S. Sonal, 1st edition, *Non-Conventional Energy Resources (For UPTU & UTU)*, S. CHAND & COMPANY PVT. LTD., 2013.
- [12] S. T. Lim, H. S. Lee, J. H. Moon, and H. J. Kim, “Performance simulation of OTEC plant by selecting asymmetric heat exchanger.” *Proceedings of KAOSTS Spring Conference*, pp. 91-94, 2017 (in Korean).
- [13] D. Bharathan, H. J. Green, H. F. Link, B. K. Parsons, J. M. Parsons, and F. Zangrando, *Conceptual Design of an Open-cycle Ocean Thermal Energy Conversion Net Power-producing Experiment (OC-otec NPPE)*, Golden Colorado, Solar Energy Research Institute, 1990.
- [14] H. S. Lee, S. W. Cha, Y. G. Jung, B. S. Choi, and H. J. Kim, “Design and experiment of the 20kW OTEC plan,” *Proceedings of KAOSTS Spring Conference*, pp. 2448-2452, 2014 (in Korean).
- [15] J. I. Yoon, B. H. Ye, J. H. Heo, H. J. Kim, H. S. Lee, and C. H. Son, “Performance analysis of 20 kW OTEC power cycle using various working fluids,” *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 8, pp. 836-842, 2013 (in Korean).