

## 폐쇄형 해양온도차발전 사이클 효율 향상 방안

이호생<sup>1</sup> · 김현주<sup>†</sup> · 정동호<sup>1</sup> · 문덕수<sup>1</sup>

(원고접수일 : 2010년 11월 29일, 원고수정일 : 2011년 1월 11일, 심사완료일 : 2011년 1월 21일)

### A Study on the Improvement for Cycle Efficiency of Closed-type OTEC

Ho-Saeng Lee<sup>1</sup> · Hyeon-Ju Kim<sup>†</sup> · Dong-Ho Jung<sup>1</sup> · Deok-Soo Moon<sup>1</sup>

**요약**: 본 연구에서는 폐쇄형 해양온도차발전 효율 향상 방안으로 재열기, 재생기 및 다단 터빈을 적용하여 각 사이클 성능을 비교·분석하였다. 기화기 증발 열원으로 26°C의 해양표층수를 이용하고 응축기 냉각 열원으로 5°C의 해양심층수를 이용하는 것으로 가정하였고, 작동유체로는 암모니아를 적용하였다. 3가지 효율 향상 방안에 대한 사이클 효율, 응축기 및 증발기 용량 등 사이클 성능을 비교·분석하였다. 기본 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 재생기를 적용하기 위해서 사이클 시뮬레이션을 수행한 결과, 재생기 부착을 위한 열교환 라인은 터빈 출구 작동유체와 펌프 출구의 작동유체를 열교환하는 것이 사이클 효율 향상에 기여하는 것으로 나타났다. 또한, 기본 사이클에 유용도 0.9의 재열기를 적용한 결과, 터빈 2기를 적용시 사이클 효율이 3.14%로 증가하였고, 동일 총 출력에 대해서 응축기 및 증발기에 필요한 해양표층수 및 해양심층수량이 감소하였다. 사이클 성능 향상 방안으로 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 재생기, 재열기 및 터빈 2기를 적용한 결과 기본 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 비해 효율은 약 6.5% 향상되었다.

**주제어**: 랭킨 사이클, 폐쇄형 해양온도차발전, 해양심층수

**Abstract**: A study on the improvement for cycle efficiency of closed-type ocean thermal energy conversion (OTEC) was studied to obtain the basic data for the optimal design of cycle. For that, OTEC cycle with a generator, a reheater and a multi-turbine was simulated and analyzed. The basic thermodynamic model for OTEC is Rankine cycle and the surface seawater of 26°C and deep seawater of 5°C were used for the heat source of evaporator and condenser, respectively. Ammonia is used as the working fluid. The cycle efficiency increased when generator is added with 0.9 generator effectiveness. When the reheater and multi-turbine are applied in the basic cycle, the cycle efficiency showed 3.14% and the capacity of heat exchanger decreased for same total cycle power. For the OTEC cycle with the generator, the reheater and the multi-turbine showed the highest cycle efficiency and increased the efficiency by more than 6.5% comparing with the basic OTEC cycle.

**Key words**: Rankine cycle, Closed type ocean thermal energy conversion, Deep seawater

### 1. 서 론

해양은 대략 지구 표면의 약 75%를 차지하고 있으며, 막대한 청정에너지를 보유하고 있다. 해양으

로 흡수되는 연간 태양 에너지의 양은 현재 인간이 소비하고 있는 전체 에너지의 양의 약 4000배에 해당되는 양이다[1]. 이러한 해양에너지는 파력,

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양연구원 해양구조물·플랜트연구부, E-mail:hjkim@moeri.re.kr, Tel: 033-630-5000)

<sup>1</sup> 한국해양연구원 해양구조물·플랜트연구부

조력, 해양온도차 등의 형태로 부존하고 있으며, 화석 연료 사용에 따른 에너지 및 환경 문제를 완화할 수 있는 에너지 자원이지만, 해양이라는 환경이 갖는 가혹성으로 인해 여타의 신재생에너지 분야에 비해 상대적으로 미개척 영역으로 남아있다. 그러나 해양공학 기술의 발전에 따른 기술적 어려움을 극복하고 새로운 청정에너지 개발 요구에 따라 활발히 연구가 진행되고 있고[2], 미국과 일본을 비롯한 선진국에서는 해양에너지를 이미 실용화 단계까지 개발하고 있어 우리나라에서도 이와 관련된 연구가 절실히 필요한 실정이다.

이 중 해양온도차발전(OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion)은 해양 표층의 상대적으로 따뜻한 해수와 심층의 상대적으로 차가운 해수의 온도차를 이용하여 발전하는 방식이다. 이러한 해수 온도차가 20°C 이상일 때 효율적인 발전이 가능한 것으로 알려져 있고, 저온도차에서도 효율적인 발전을 이룰 수 있는 시스템 개발에 관한 연구가 진행되고 있다[3].

해양온도차발전의 개념은 1881년 프랑스에서 최초로 제안된 이후[4] 1960년대 전반에 산발적인 시험이 시도되었으나, 기술상의 어려움 등으로 성공하지 못하였다. 그러나 1973년 1차 석유파동 이후 다시 연구가 시작되어 그 개발속도가 가속화되어 왔으며, 미국, 일본 등지에서 소규모 해상실험이 실시되고 있다. 미국은 1978년 하와이 근해에서 50kW급의 소규모 시험발전이 성공하였고, 1993년도에는 약 213kW의 전기를 생산하는 등 해양온도차발전에 대한 주도적인 연구로 현재 세계적인 기술을 선도하고 있다[5]. 일본도 1974년부터 산학연 공동으로 실험실 규모의 시험을 계속하고 있는데, 1981년 남태평양의 나우르(Nauru) 공화국 해역에서 최대출력 120kW의 실험발전이 성공한 바 있고, 1982년 말에는 큐슈 서남쪽에 위치한 도쿠노시마(Tokunoshima)에서 50kW급의 육상형 폐순환식 해양온도차발전시험에 성공하였다[6]. 그 후 사가대학에서 암모니아 및 R22를 작동유체로 하는 해양온도차발전 실험장치를 설치하여 꾸준한 연구를 수행 중에 있으며[7], 해양온도차발전 효율 향상을 위한 새로운 사이클 개발[8]과

담수화 기술개발 등 많은 복합 연구[9] 및 인도와의 협력을 통한 1 MW급 해상형 OTEC 플랜트 연구 등 많은 연구를 수행 수행하고 있다[10].

국내에서는 비록 제한적이긴 하지만, 동해역이 해양온도차발전에 적합한 것으로 알려져 있다[11]. 특히 동해는 지형적으로 수심이 깊어서 해안에서 근거리에 심층수가 존재하는 유리한 조건을 가지고 있으며, 해안으로부터 5~10 km 내외에서 심층수의 획득이 가능한 장점을 보유하고 있다. 따라서 향후 국내에서도 자연 환경적 특성과 발전소 배출수와 같은 인공적 특성을 활용한다면 온도차발전의 상용화가 가능하므로 이에 대한 꾸준한 연구가 필요한 시점이다. 국내에서는 해양온도차발전 사이클에 대한 시뮬레이션[12, 13] 등을 수행한 바 있으나 여전히 해양온도차발전 사이클 효율 향상 방안에 대한 연구는 극히 제한적이다.

따라서 본 연구에서는 폐쇄형 해양온도차발전 사이클을 모사하여 효율 향상 방안으로 재열기, 재생기 및 다단 터빈을 적용하여 각 사이클 성능을 비교·분석하고자 한다.

## 2. 폐쇄형 해양온도차발전 사이클

### 2.1 폐쇄형 해양온도차발전 사이클

Figure 1은 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클의 개략도를 나타내고 있다. 작동유체는 기화기에서 표층수와 열교환 후 증발하여 과열증기 상태가 되어 터빈으로 유입된다. 증발한 작동유체는 터빈 가동 후 응축기로 유입되어 심층수와 열교환하여 응축되면서 과냉 상태가 되어 펌프에 의해 승압되어 다시 기화기로 유입된다. Figure 2는 폐쇄형 해양온도차발전 사이클의 T-s선도를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 기화기는 가열, 상변화, 과열 구간 등 3 구간으로, 응축기는 상변화 및 과냉 등 2 구간으로 설정하였고, 터빈 및 펌프는 각각 이상적인 등엔트로피과정으로 가정하였다. 또한, 외부와의 열교환 및 열교환기 내에서의 압력강하는 무시하였다. 폐쇄형 해양온도차발전 사이클을 모사하기 위해 EES(Engineering Equation Solver) 프로그램을 이용하였고, 기본적인 랭킨 사이클을 설계하여 시뮬레이션에 이용하였다.

EES는 증기동력사이클 및 냉동사이클 등 열역학적 사이클 모사에 필요한 상태값을 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있어 이번 사이클 시뮬레이션에 사용하였다.

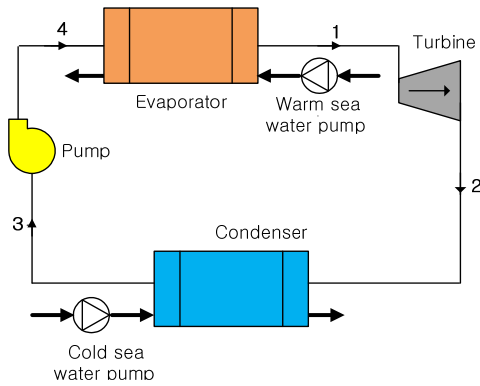


Figure 1: Diagram of closed OTEC cycle.

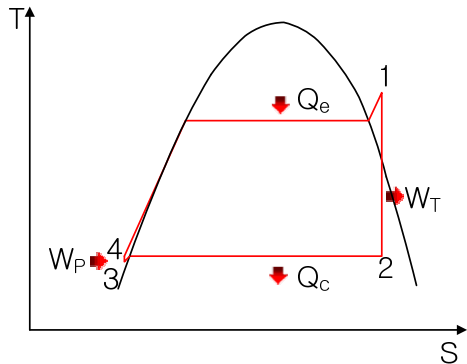
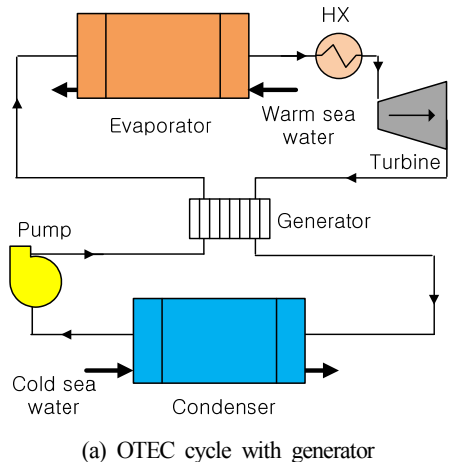


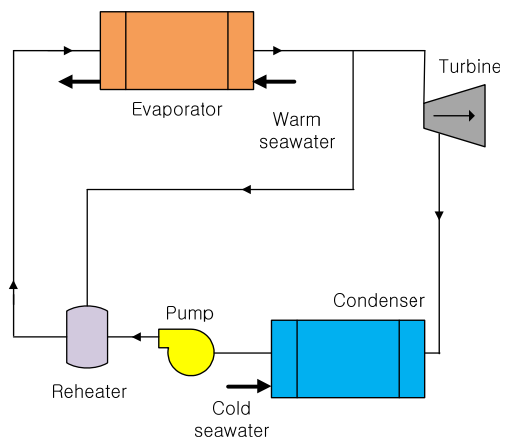
Figure 2: T-s diagram of closed OTEC cycle.

2.2 폐쇄형 해양온도차발전 사이클 효율 향상 방안  
 해양온도차발전시스템은 해양심층수와 해양표층수와의 온도차를 이용해 전력을 생산하는 것으로, 시스템 효율은 입력 에너지량인 증발부 열량에 대한 출력 에너지량인 터빈 출력의 비로서 나타낼 수 있다. 따라서 증발부의 열부하를 줄여 입력 에너지를 줄이고, 터빈 출력을 증대시킬 수 있다면 해양 온도차 발전시스템 효율을 증대시킬 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 폐쇄형 해양온도차발전 사이클 효율 향상을 위한 방안으로 재생기를 부착하는 방안, 재열기를 부착하는 방안, 다만 터빈을 적용하는 방안 등 3가지 방안에 대해서 시뮬레이션

을 수행하고, 기본 사이클과의 성능을 비교하였다. 재생기를 부착하는 방안은 Figure 3(a)에 나타난 바와 같이 터빈 출구에서 과열된 증기가 가지는 열을 회수해서 기화기로 유입되는 작동유체에 열을 전달하여 사이클 효율을 향상시키는 방안이고, 재열기를 부착하는 방안은 Figure 3(b)에 나타난 바와 같이 증발부에서 기화되는 작동유체 일부를 바이패스시켜 작동유체 펌프로 유입되는 작동유체와 열교환시키게 되면 작동유체 펌프로 유입되는 작동유체의 온도가 상승하게 되어 증발부 열부하를 줄일 수 있게 되어 사이클 효율을 향상시키는 방안이다.



(a) OTEC cycle with generator



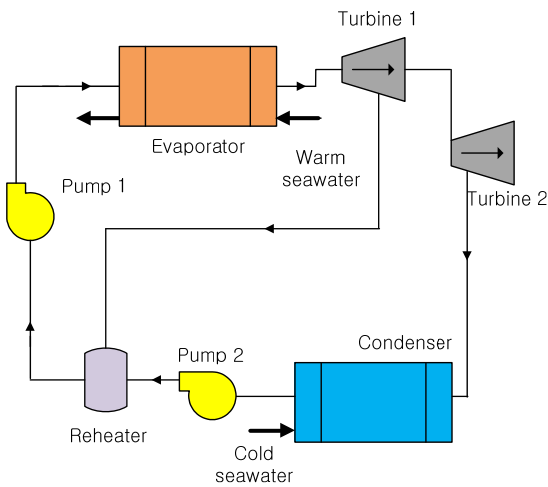
(b) OTEC cycle with reheater

Figure 3: Diagram of closed OTEC cycle with generator and reheater.

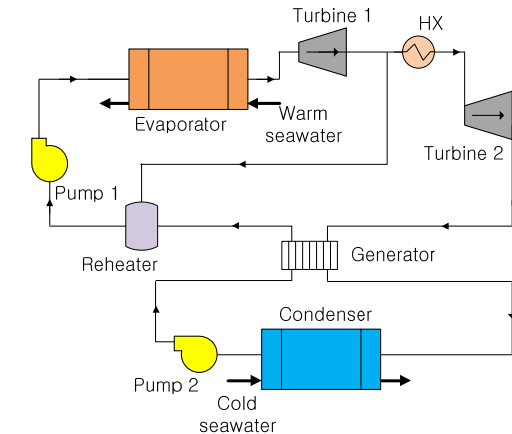
또한, 해양온도차발전시스템에서 터빈의 출력이 중요한 부분이라 할 수 있다. 터빈으로 유입되는 작동유체가 보다 높은 에너지 레벨을 가지고 있으면 좀 더 많은 터빈 출력을 달성할 수 있게 된다. 즉, 고단 터빈 출구에서의 작동유체와 좀 더 높은 온도 레벨을 가지는 미활용에너지인 발전수 배열이나 폐열 혹은 태양열 집열기에 의한 축열조 등과 복합 구성하는 태양열 시스템과의 연계를 들 수 있다. 이 미활용 에너지를 작동유체와 열교환시켜 저단 터빈으로 유입되는 작동유체의 에너지 레벨을

높이게 되면 해양 온도차 발전시스템의 효율을 증대시킬 수 있게 된다. 따라서 **Figure 4(a)**에 나타난 바와 같이 터빈과정을 다단화시키면서 **Figure 3(b)**의 재열기를 결합시키는 방안과 **Figure 4(b)**에 나타난 바와 같이 재열기 및 재생기를 모두 결합시키는 방안에 대해 사이클 시뮬레이션을 수행하였고, 그 성능을 비교·분석하였다.

**Table 1**은 사이클 모사를 위한 조건을 나타내고 있다. **Table 1**에서와 같이 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클 모사를 위해 사이클 출력을 50 kW로 설정하였으며, 작동유체는 암모니아, 응축기 냉각열원으로는 해양심층수 온도를 5℃로, 기화기 증발열원으로는 해양표층수를 26℃로 설정하여 사이클 성능을 분석하였고, 터빈 및 펌프의 효율은 85%로 가정하였다.



(a) OTEC cycle with reheater and multi-turbine



(b) OTEC cycle with reheater, generator and multi-turbine

**Figure 4:** Diagram of closed OTEC cycle with multi-turbine.

**Table 1:** Simulated conditions

Parameter	Value
Gross power (kW)	50
Cold sea water temperature (°C)	5
Warm sea water temperature (°C)	26
Isentropic turbine efficiency (%)	85
Isentropic pump efficiency (%)	85
Working fluid (-)	Ammonia

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 재생기를 적용한 해양온도차발전사이클 성능 비교

먼저 **Figure 1**과 같이 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 재생기를 적용하기 위해, 기화기로 유입되는 표층수 온도는 26℃로 설정하였다. 또한, 그림 내 열교환기(HX)에서 표층수보다 높은 온도 레벨의 이용 가능한 폐열을 기화기 출구 증기 상태의 작동유체와 열교환시킨다. 이 열교환을 통해 온도가 상승한 작동유체가 사이클 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션하였다. 폐열과의 열교환을 통해 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도상승을 5~20℃로 변화시켜 시뮬레이션한 결과 작동유체의 온도상승이 약 13.5℃ 이상일 때, 터빈 출구상태는 과열 상태가 되고, 응축기에서 이 과열 증기의 열

을 냉각시키게 되므로 이용 가능 열원을 버리게 되고, 이로 인해 응축기 용량이 증대되는 문제가 발생하게 된다. 본 시뮬레이션에서는 응축기의 냉각 열원으로 심층수를 가정하였고, 응축기 용량 증대에 따른 심층수 취수량이 증가하게 되는 문제가 발생하게 되므로 터빈 출구에서 발생하는 이용 가능 열원을 회수하여 사용하여 사이클 효율을 증대시키기 위해 **Figure 3(a)**에서와 같은 재생기를 적용할 필요가 있음을 알 수 있다. 먼저 재생기 위치를 결정하기 위해 응축기 출구 및 펌프 출구에 각각 재생기를 적용하여 사이클 시뮬레이션을 수행한 결과, **Figure 3(a)**에 나타난 바와 같이 펌프 출구에 적용했을 때가 펌프 동력을 감소시켜 사이클 효율이 더 높게 나타났다. 따라서 **Figure 3(a)**와 같이 재생기를 적용하고 재생기 효율을 0.9로 가정했을 때, 기본 폐쇄형 해양온도차발전 사이클과 재생기를 적용한 해양온도차발전 사이클 성능을 **Table 2**에 나타내었다. **Table 2**에서와 같이 재생기를 적용하여 터빈 출구 작동유체의 과열 증기가 가지는 열을 회수하여 기화기로 유입되는 작동유체에 전달한 결과 사이클 효율이 증가하였고, 동일 총 출력에 대한 필요 열교환기 및 펌프 용량이 감소하였다. 본 시뮬레이션 조건에 대해 재생기를 적용하여 약 4.25 kW의 열량을 회수하였으며, 해양온도차발전 플랜트 용량이 커질수록 재생기를 통해 회수되는 열량은 증가할 것으로 생각된다.

**Table 2:** Cycle performance with generator

Parameter	Basic cycle	Improved cycle
Cycle efficiency (%)	3.10	3.18
Evaporating capacity (kW)	1590	1498
Condensing capacity (kW)	1539	1502
Pump work (kW)	0.696	0.648

### 3.2 재열기를 적용한 해양온도차발전사이클 성능 비교

**Figure 3(b)**에 나타난 바와 같이 터빈이 1기 일 때 재열기를 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클과 성

능 차이가 거의 없었다. 이는 터빈으로 유입되는 작동유체를 일부 바이패스시켜 증발기로 유입되는 작동유체와 열교환시킴으로 인해 기화기 열량을 감소시킬 수 있었으나, 그로 인해 터빈으로 유입되는 증기량이 감소하여 터빈 출력이 감소하게 되어 사이클 효율 향상은 거의 나타나지 않았다. 따라서 **Figure 4(a)**와 같이 터빈을 2기 적용하고, 고압단 터빈에서 도출된 작동유체 일부 바이패스시켜 펌프 2에서 나오는 작동유체와 재열기에서 열교환시키는 사이클을 시뮬레이션하였고, 그 결과를 **Table 3**에 나타내었다. **Table 3**에서와 같이 터빈 2기 및 재열기를 적용한 결과 기본 사이클에 비해 사이클 효율이 3.14%로 증가하였고, 동일 총 출력에 대해서 응축기 및 증발기에 필요한 해양표층수 및 해양심층수량이 감소하였다. 외부 열원과의 열교환없이 사이클 내를 순환하는 작동유체가 가지는 온도차를 이용해 재열기 및 다단 터빈을 적용한 결과, 기본 사이클에 비해 주요 성능 지표의 향상은 크지 않았지만 해양온도차발전 사이클의 경제적인 발전을 위한 용량이 100 MW급 이상이라는 것을 봤을 때[1], 재열기를 적용한 사이클 효율 향상은 대용량으로 갈수록 발전 출력 향상에 기여할 것으로 생각된다.

**Table 3:** Cycle efficiency with reheater and multi-turbine

Parameter	Basic cycle	Improved cycle
Cycle efficiency (%)	3.10	3.14
Warm seawater flow rate (t/h)	441.1	436.6
Cold seawater flow rate (t/h)	226.9	225.8
Pump work (kW)	0.696	0.692

### 3.3 다단 터빈을 적용한 해양온도차발전 사이클 성능 비교

**Figure 4(b)**에 나타난 바와 같이 앞서 사이클 효율 향상 방안으로 제시된 재생기, 재열기 및 다단 터빈을 모두 적용했을 때의 사이클 성능을 시뮬레이션하였다. 먼저 외부 열원과의 열교환을 위한

열교환기 위치를 결정하기 위해 기화기 출구 및 고단 터빈 출구에 각각 적용하여 사이클 시뮬레이션을 수행한 결과, **Figure 4(b)**에 나타난 바와 같이 기화기 출구에 적용했을 때가 고단 터빈 및 저단 터빈 출력을 모두 향상시켜 사이클 효율이 더 높게 나타났다. 따라서 **Figure 4(b)**와 같이 재생기, 재열기 및 다단 터빈을 적용했을 때의 사이클 성능을 **Table 4**에 나타내었다. **Table 4**에서와 같이 기본 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 비해 효율은 약 6.5% 향상되었고, 응축기에 필요한 해양심층수량을 약 2.7% 감소시킬 수 있었다.

**Table 4:** Cycle performance with reheater, generator and multi-turbine

Parameter	Basic cycle	Improved cycle
Cycle efficiency (%)	3.10	3.30
Evaporating capacity (kW)	1590	1484
Condensing capacity (kW)	1539	1480
Pump work (kW)	0.696	0.654
Warm seawater flow rate (t/h)	441.1	411.8
Cold seawater flow rate (t/h)	226.9	220.8

#### 4. 결 론

본 연구에서는 폐쇄형 해양온도차발전 사이클 성능 향상을 위해 재생기, 재열기 및 다단 터빈 방법을 적용하여 사이클 성능을 시뮬레이션하였고, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 기본 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 재생기를 적용하기 위해서 사이클 시뮬레이션을 수행한 결과, 재생기 부착을 위한 가열 라인은 터빈 출구 작동유체로 펌프 출구의 작동유체를 열교환하는 것이 사이클 효율 향상에 기여하는 것으로 나타났다.

(2) 기본 사이클에 재열기를 적용한 결과, 터빈 1기에서는 재열기를 적용한 사이클 성능 향상 효과가 거의 나타나지 않았고, 터빈 2기를 적용시 사이클 효율이 3.14%로 증가하였으며, 동일 총 출력에 대해서 응축기 및 증발기에 필요한 해양표층수 및 해양심층수량이 감소하였다.

(3) 사이클 성능 향상 방안으로 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 재생기, 재열기 및 터빈 2기를 적용한 결과 기본 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 비해 효율은 약 6.5% 향상되었고, 동일 총 출력에 대한 응축기 및 증발기에서의 필요 해수량을 감소시킬 수 있었다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- [1] L. A. Vega, “Ocean thermal energy conversion primer”, Marine Technology Society Journal, vol. 6, no. 4, pp. 25-35, 2003.
- [2] 홍기용, 현범수, “해양에너지 기술현황과 전망”, 설비저널, 제39권, 제1호, pp. 13-20, 2010.
- [3] 신상호, 정동수, 김종보, 서태범, 천원기, 오정무, “폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 관한 연구”, 태양에너지, 제17권, 제4호, pp. 23-33, 1997.
- [4] 서태범, “해양온도차발전 시스템의 소개”, 설비저널, 제30권, 제1호, pp. 18-24, 2001.
- [5] 박성식, 김남진, “전력 및 담수생산을 위한 해양온도차발전에 대한 연구”, 한국태양에너지학회 춘계학술발표대회 논문집, pp. 243-248, 2010.
- [6] L. A. Vega, “A strategy for OTEC commercialization”, Proceedings of the 1997 International OTEC/DOWA Association, pp. 235-247, 1997.
- [7] H. Uehara, and Y. Ikegami, “Optimization of a Closed-Cycle OTEC system”, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 112, pp. 247-256, 1990.
- [8] H. Uehara, A. Miyara, and Y. Ikegami, “Performance analysis of an OTEC plant and a desalination plant using

an integrated hybrid cycle”, Journal of solar energy engineering, vol. 118, pp. 115-122, 1996.

- [9] Y. Ikegami, T. Sasakib, H. Goudab, and H. Uehara, “Experimental study on a spray flash desalination”, Desalination, vol. 194, Issues 1-3, pp. 81-89, 2006.
- [10] Y. Ikegami, “Strategy and future of by-product using ocean thermal energy conversion in Japan and world for sustainable energy and water resource”, proceedings of the International Forum on Ocean Energy Exploitation Technology, pp. 3-44, 2010.
- [11] Korea Power Company, A Study on the Development of Ocean Thermal Energy conversion and Wave Power Generation System, Technical report, KRC-89G-T10, 1989.
- [12] 이호생, 김현주, 정동호, 문덕수, “50kW급 폐쇄순환식 해양온도차발전 파일럿 플랜트의 성능해석”, 선박해양기술, 제49권, pp. 75-80, 2010.
- [13] 김현주, 이호생, 정동호, 문덕수, “발전소 온배수를 이용한 1MW급 폐쇄형 해양온도차발전 성능해석”, 한국마린엔지니어링학회, 제34권, 제4호, pp. 470-476, 2010.



**김현주(金鉉周)**

1995년 부경대학교 해양공학과 졸업(공학박사) 2009년 The University of Hawaii, 방문연구원 현재 한국해양연구원 해양심층수연구센터장



**정동호(鄭東浩)**

2002년 한국해양대학교 해양공학과 졸업(공학박사) 현재 한국해양연구원 해양심층수연구센터 선임연구원



**문덕수(文德洙)**

1999년 충남대학교 해양학과 졸업(이학박사) 2002년 Florida State University, post-doc 현재 한국해양연구원 해양심층수연구센터 책임연구원

## 저 자 소 개



**이호생(李虎生)**

2006년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업(공학박사) 2007년 The University of Illinois, ACRC, post-doc 현재 한국해양연구원 해양구조물·플랜트연구부 선임연구원