

발전소 온배수를 이용한 1MW급 폐쇄형 해양온도차발전 성능해석 김현주[†] · 이호생¹ · 정동호¹ · 문덕수¹

(원고접수일: 2010년 4월 7일, 원고수정일: 2010년 4월 19일 심사완료일: 2010년 5월 18일)

Analysis of 1MW Closed OTEC Cycle Using Thermal Effluent and Waste Heat

Hyeon-Ju Kim[†] · Ho-Saeng Lee¹ · Dong-Ho Jung¹ · Deok-Soo Moon¹

요약: 발전소 온배수 및 폐열을 이용한 1 MW급 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 대한 성능을 비교 분석하였다. 폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 대한 열역학적 모델은 랭킨 사이클이고, 기화기 증발 열원으로 발전소 온배수를 이용하여 사이클 효율, 기화기 및 응축기 열량 등 사이클 성능을 비교·분석하였다. 발전소 온배수 온도가 증가함에 따라 기화기 내 증발 포화압력은 상승하게 되고 그로 인해 사이클 효율은 증가하였고, 총 출력 1 MW에 필요한 기화기 및 응축기 용량은 감소하였다. 따라서 발전소 온배수는 폐쇄형 해양온도차발전에서 주요한 열원으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 주위 이용 가능한 폐열이 있을 때 기화기 출구 작동유체와 열교환시켜 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도를 상승시킨다면 사이클 효율은 크게 증가할 것이다.

주제어: 폐쇄형 해양온도차발전, 발전소 온배수, 해양심층수

Abstract: The thermodynamic performance of closed ocean thermal energy conversion (OTEC) cycle with 1 MW gross power was evaluated to obtain the basic data for the optimal design of OTEC. The basic thermodynamic model for OTEC is Rankine cycle and the thermal effluent from power plant was used for the heat source of evaporator. The cycle performance such as efficiency, heat exchanger capacity, etc. was analyzed on the temperature variation of thermal effluent. The saturated pressure of evaporator increased with respect to the increase of thermal effluent temperature, so the cycle efficiency increased and necessary capacity of evaporator and condenser decreased under 1 MW gross power. As the thermal effluent temperature increases about 15°C, the cycle efficiency increased approximately 44%. So, it was revealed that thermal effluent from power plant is important heat source for OTEC plant. Also, if there is an available waste heat, it can be transferred heat to the working fluid from the evaporator through heat exchanger and cycle efficiency will be increased.

Key words: Closed type ocean thermal energy conversion, Thermal effluent, Deep seawater

1. 서 론

오늘날 과학기술의 급속한 발전으로 인한 산업화는 인류의 삶의 질을 크게 개선하여 왔지만, 이에 따른 화석연료 소비의 증가로 심각한 에너지 수급

및 지구 온난화라는 환경 문제에 직면하고 있다. 이런 지구온난화에 대처하기 위한 목적으로 국제적으로 기후변화협약 등을 통해 온실가스 감축을 위한 실천적 규범을 발효하였으나, 우리나라를 비롯

[†] 교신저자(한국해양연구원 해양심층수연구센터, E-mail:hjkim@moeri.re.kr, Tel: 033-630-5000)

¹ 한국해양연구원 해양심층수연구센터

한 세계의 에너지 소비는 향후 지속적인 경제발전을 추진하기 위해서 계속해서 증가할 것으로 전망되고 있다. 따라서 기존 화석연료를 대체할 수 있는 환경에 무해한 대체 에너지원이 필요로 하게 되었으며, 이에 관련한 많은 연구가 수행되고 있다.

이 중 해양 에너지는 고갈 우려가 없는 청정에너지 자원이다. 지구 표면의 약 71%에 달하는 해양은 조력, 조류, 파력, 해양온도차 등 다양한 형태의 막대한 에너지 자원이 부존한다. 해양 에너지는 기존 화석에너지에 비해서 비용이 많은 든다는 단점 등 문제가 있지만 해양공학 기술의 발전에 따른 기술적 어려움의 극복과 새로운 청정에너지 개발의 필요성의 급증에 따라 활발한 연구가 진행되고 있고 미국과 일본을 비롯한 선진국에서는 해양에너지를 이미 실용화단계까지 개발하고 있어 우리나라에서도 이와 관련된 연구가 절실히 필요한 실정이다.

이용 가능한 해양 에너지 중 해양온도차발전은 표층수와 심층수의 온도차를 이용하여 암모니아 등의 작동유체로 터빈을 돌려 발전하는 방식으로 조력이나 파력 발전과 같은 시스템에 비해 해상요소에 별로 영향을 받지 않고 전력 생산이 가능하다. 해양온도차발전의 개념은 1881년 프랑스에서 최초로 제안된 이후[1] 1930년도에 Claude는 개방형 해양온도차발전 실험을 수행하여 22kW 정도의 출력을 생산하였으나, 장치 구동에 소모되는 동력보다 적은 양이었다[2].

그 후, 1960년대 전반에 산발적인 시험이 시도되었으나, 기술상의 어려움 등으로 성공하지 못하였고, 1973년 1차 석유파동 이후 다시 연구가 시작되어 그 개발속도가 가속화되어 왔으며, 미국 및 일본 등지에서 소규모 해상실험이 실시되고 있다. 미국은 1979년 하와이 Keahole point에서 50kW급 실험용 폐쇄형 해양온도차발전 시스템을 최초로 실험에 성공하는 등[3] 해양온도차발전에 대한 주도적인 연구로 현재 세계적인 기술을 선도하고 있다. 일본도 1974년에 발족한 Sun-shine 계획의 일부로 1982년 도쿠노시마에 50kW급 육상형 폐순환식 해양온도차 발전을 설치하였으며[4], 산학연 공동으로 실험실 규모의 시험을 계속하고 있으며, 사가대학에서 75kW급 해양온도차발전 실

험장치를 설치하여 꾸준한 연구를 수행 중에 있으며, 혼합 작동 유체를 사용한 Uehara 사이클을 개발하여 사이클 효율을 향상시켰다[5].

국내에서는 동해에 해양온도차 발전에 적합한 해수 온도차를 가지는 것으로 밝혀졌고[6], 특히 동해는 지형적으로 수심이 깊어서 비교적 해안에서 큰 거리에 심층수가 존재하는 유리한 조건을 가지고 있으며, 해안으로부터 5~10 km 내외에서 심층수의 획득이 가능한 장점을 보유하고 있다[7]. 엄 등이 20 kW급 해양온도차 파일럿 플랜트 성능실험을 수행한 바 있으나[8], 여전히 해양온도차 발전에 대한 연구는 극히 제한적이다.

한편, 우리나라 연안역에서 겨울철에 표층수온이 저하되는 문제를 해결하기 위해 화력 또는 원자력 발전소 냉각수로 사용되어 표층 수온에 비해 약 7~13°C 정도 높게 배출되는 온배수를 이용할 수 있다. 특히, 우리나라는 연안역에 위치한 발전소가 많아 이런 발전소 온배수나 높은 온도 레벨의 폐열 등을 사용한다면 해양온도차발전 효율을 증대시킬 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 발전소 온배수를 이용한 폐쇄형 온도차발전 사이클을 모사하여 온배수 공급 온도에 따른 사이클 성능을 비교하고, 또한 이용 가능한 폐열 사용으로 인한 작동유체의 온도 상승이 사이클 효율에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 폐쇄형 해양온도차발전 사이클

기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클의 개략도를 **Figure 1**에 나타내었다. 그림에서와 같이 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전 사이클은 기화기, 터빈, 응축기 및 펌프로 구성되어 있고 이들 구성기가 서로 파이프라인으로 연결되어 작동되는데 폐쇄형 해양온도차발전의 기본 원리는 일반 발전의 원리와 동일하다. 표층수와 심층수 사이의 온도차를 이용해 비등점이 낮은 작동유체를 표층수로 증발시킨 뒤 그 압력차를 이용해 터빈에서 발전하는 것으로, 고온의 열원에서 저온의 열원으로 열이 흘러 들어가 터빈을 구동시켜 전력을 생산하는 방법이다. 작동유체는 기화기에서 표층수와 열교환하여 증발하여 과열증기 상태가 되어 터빈으로 유입된다.

작동유체 증기는 터빈 가동 후 응축기로 유입되어 심층수와 열교환하여 응축되면서 과냉 상태가 되어 펌프에 의해 증압되어 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.

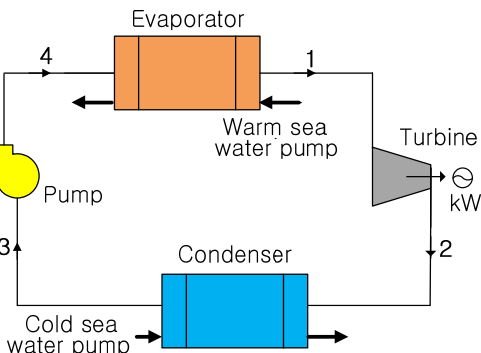


Figure 1: Diagram of Closed OTEC cycle.

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.

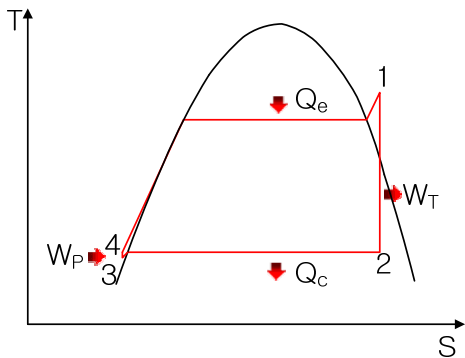


Figure 2: T-s diagram of Closed OTEC cycle.

Table 1은 사이클 모사를 위한 조건을 나타내고 있다. Table 1에서와 같이 발전소 온배수를 이용한 폐쇄형 해양 온도차 발전 사이클 모사를 위해 사이클 출력을 1 MW로 설정하였으며, 작동유체는 암모니아, 심층수 온도는 2 °C, 기화기 증발열원으로 사용되는 발전소 온배수 온도는 25 ~ 36°C로 변화시켜 사이클 성능을 분석하였다.

Table 1: Simulated condition.

Parameter	Value
Gross power (MW)	1
Cold sea water temperature (°C)	2
Warm sea water temperature (°C)	25 ~ 36
Isentropic turbine efficiency (%)	85
Isentropic pump efficiency (%)	85
Working fluid	Ammonia

또한, 기화기 증발열원으로 25°C의 표층수를 이용하면서 표층수보다 높은 온도 레벨의 이용 가능한 폐열을 기화기 출구 증기 상태의 작동유체와 열교환시켜 터빈으로 유입시키는 작동유체의 온도상승이 사이클 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 기본적인 폐쇄형 해양온도차발전에 대해서 기화기 출구의 작동유체와 해양 표층수보다 온도 레벨이 높은 폐열 등을 이용할 때의 사이클 개략도를 Figure 3에 나타내었다. Figure 3에서와 같이 기화기 출구의 작동유체는 열교환기(HX)에서 폐열과 열교환 후 터빈으로 유입된다.

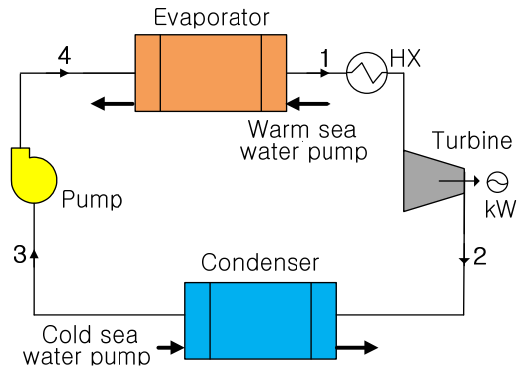


Figure 3: Diagram of Closed OTEC cycle using waste heat.

3. 결과 및 고찰

3.1 발전소 온배수온도에 따른 사이클 특성

Figure 4는 강원도 영동 소재 발전소의 연간 발전소 온배수의 온도 변화를 나타내고 있다. 발전소 냉각수로 사용되는 해수의 온도가 변화함으로 온배수 온도 역시 변화하고 있다. 그림에서와 같이 2월 경 온배수 온도는 약 21°C로 가장 낮고, 8월 경 약 36°C로 가장 높게 나타났다. 본 사이클 모사에서 해양온도차발전 응축기에 냉각열원으로 사용되는 심층수 온도를 2°C로 가정하였고, 일반적으로 해양온도차발전에 사용되는 심층수 및 표층수 온도차가 20°C이상일 때 경제적인 발전이 가능하므로 [9] 발전소 온배수는 연중 해양온도차발전 사이클의 기화기 증발열원으로 유효한 열원임을 알 수 있다.

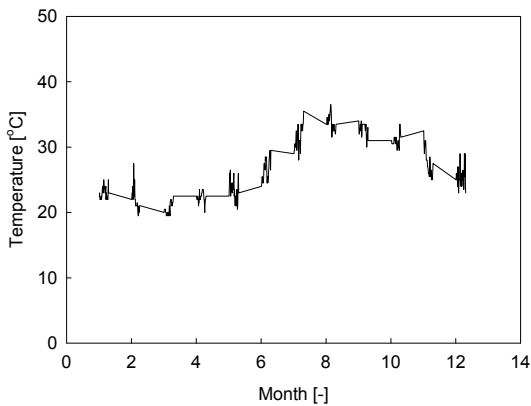


Figure 4: Temperature variation of thermal effluent.

Figure 5는 발전소 온배수를 폐쇄형 해양온도차발전 기화기의 증발열원으로 사용할 때, 총 출력 1 MW에 대해 기화기 유입 온배수 온도에 따른 기화기 내 작동 유체의 포화 압력 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 기화기로 유입되는 발전소 온배수 온도가 증가함에 따라 기화기 내 작동유체의 포화 압력이 증가함을 알 수 있고, 그로 인해 터빈으로 유입되는 작동유체의 압력이 상승하게 됨을 알 수 있다.

Figure 6은 총 출력 1 MW에 대해 기화기 유입 온배수 온도에 따른 사이클 효율 변화를 나타내고 있다. 해양온도차발전 사이클 효율은 입력량인

기화기 열량에 대한 출력량인 터빈에서의 출력의 비로 나타낼 수 있다. 그림에서와 같이 기화기로 유입되는 온배수온도가 증가함에 따라 기화기 내 증발 포화압력이 상승하게 되고 그로 인해 터빈 입·출구 압력차가 증가하여 사이클 효율이 증가함을 알 수 있다. 기화기 유입 온배수온도가 36°C일 때 사이클 효율은 약 6.3%, 25°C일 때 사이클 효율은 약 3.7%로 나타났다.

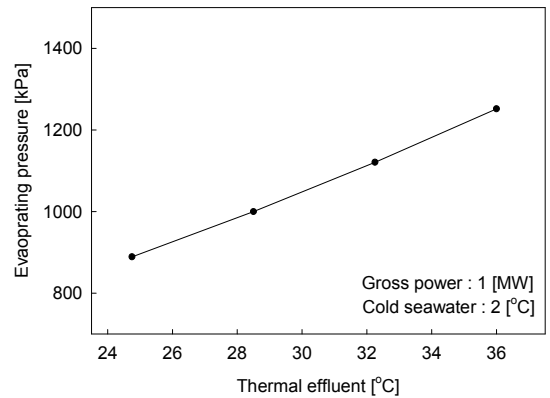


Figure 5: Evaporating pressure on thermal effluent.

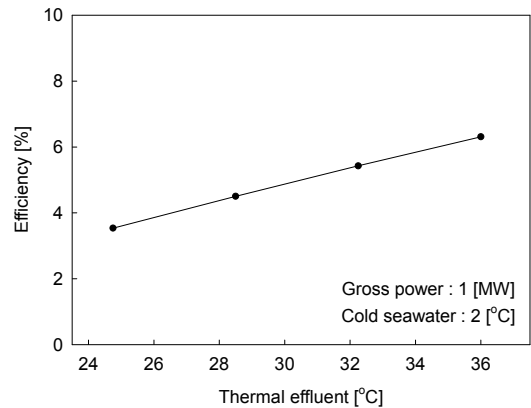


Figure 6: Efficiency variation on thermal effluent.

Figure 7은 총 출력 1 MW에 대해 기화기 유입 온배수 온도에 따른 사이클 기화기 및 응축기 용량 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 기화기 유입 온배수 온도가 증가함에 따라 사이클 효율이 상승하게 되고 그로 인해 총 출력 1 MW에 필요한 기화기 및 응축기 용량은 감소함을 알 수 있

다. 기화기 유입 온배수 온도가 36℃일 때 기화기 용량은 약 15.6 MW, 28℃에서는 21.92 MW로 나타나 기화기 유입 온배수 온도가 36℃일 때 기화기 용량은 25℃에 비해 약 28.8% 감소하였다.

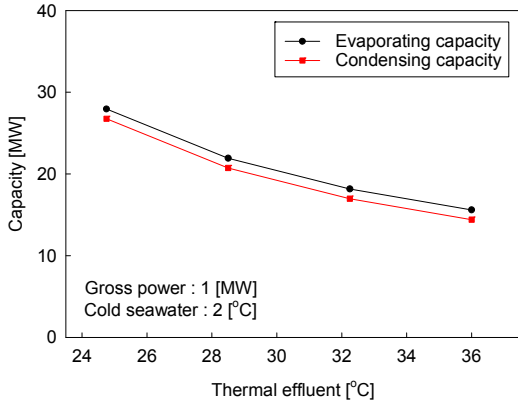


Figure 7: Capacity variation on thermal effluent.

Figure 8~9는 총 출력 1 MW에 대해 기화기 유입온배수 온도에 따른 사이클 필요 냉매 순환량 및 해수 유량 변화를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 기화기로 유입되는 발전소 온배수 온도가 상승함에 따라 사이클 효율이 증가하게 되고 그로 인해 총 출력 1 MW급에 필요한 냉매 순환량 및 해수 유량이 감소함을 알 수 있다.

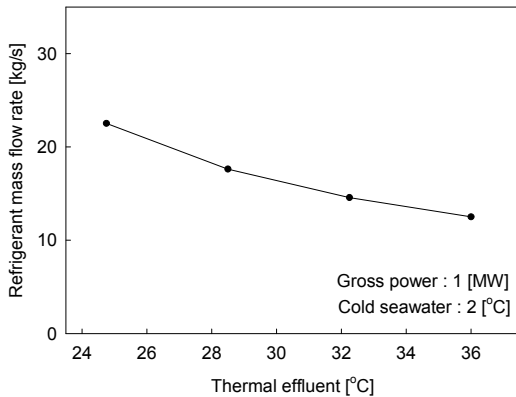


Figure 8: Refrigerant mass flow rate on thermal effluent.

3.2 폐열로부터의 열 획득에 따른 사이클 특성

폐쇄형 해양온도차발전 사이클에서 기화기에서

의 작동유체 상태는 유입되는 표층수의 온도에 따라 결정된다. 표층수가 25℃이고 심층수가 2℃일 때, Figure 3에서와 같이 사이클 터빈으로 유입되는 작동유체 증기를 표층수보다 높은 온도 레벨을 가진 이용 가능한 폐열 등과 열교환 후 온도가 상승하여 터빈으로 유입시켰을 때 사이클 효율 변화를 모사하였다.

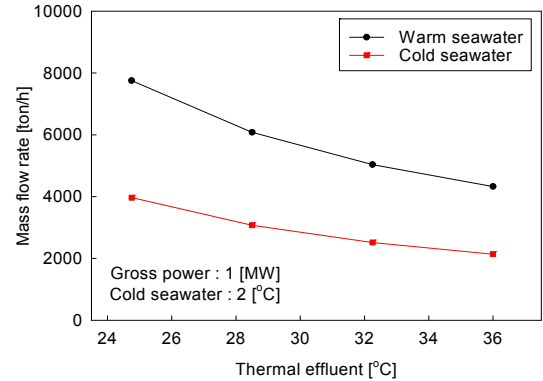


Figure 9: Seawater flow rate on thermal effluent.

Figure 10은 기화기 출구 작동유체가 해양 표층수보다 높은 온도레벨의 폐열 등과 열교환 후 온도가 상승하여 터빈으로 유입시켰을 때, 그 온도 상승에 대한 사이클 효율을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 외부 열원과의 열교환을 통해 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도가 상승할수록 사이클 효율이 증가함을 알 수 있다. 총 출력이 1 MW에 대해 외부 열원과의 열교환을 통해 터빈 유입 작동유체의 온도가 약 20℃ 상승시 사이클 효율은 약 3.82%로 터빈 유입 작동 유체 온도 상승이 없을 때에 비해 약 3.2% 증가하였다.

Figure 11은 터빈으로 유입되는 작동 유체의 온도 상승에 대한 기화기 및 응축기 용량을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 발전소 온배수 및 폐열과의 열교환을 통해 터빈 유입 온도가 상승함에 따라 사이클 효율이 증가하게 되고 그로 인해 총 출력 1 MW에 필요한 기화기 및 응축기 용량이 감소함을 알 수 있다. 그림에서와 같이 기화기 출구 작동유체 증기가 폐열 등과의 열교환을 통해 5℃ 온도 상승시 기화기 및 증발기 용량감소가 크게 나타

남을 알 수 있다. 그림에서 세모는 발전소 온배수 및 폐열과의 열교환량과 기화기열량을 합산한 사이클로의 총 입력량을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 터빈으로 유입되는 작동유체의 온도가 증가할수록 열교환량이 증가함을 알 수 있어 사이클 효율 및 열교환기 용량, 폐열의 온도 레벨 등 여러 지표 등을 다각도로 검토할 필요가 있다. 하지만 해양온도차발전 플랜트의 막대한 건설비용 및 낮은 발전 효율을 감안할 때, 사이클 효율 상승을 위해 발전소 온배수 및 버려지는 폐열을 활용할 수 있는 방법 모색이 필요하리라 생각된다.

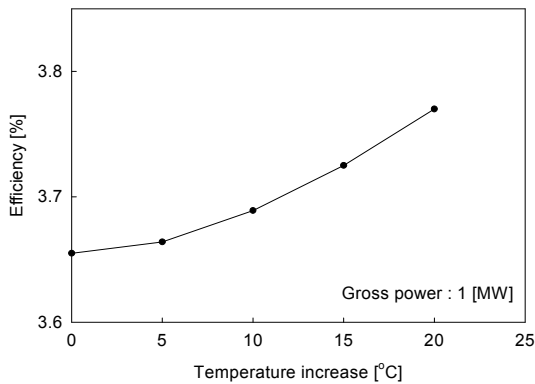


Figure 10: Efficiency on working fluid temperature increase.

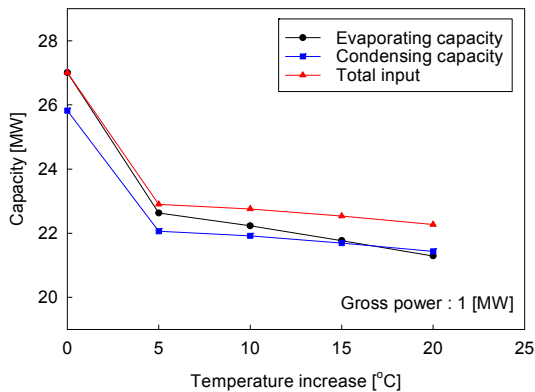


Figure 11: Capacity on working fluid temperature increase.

4. 결 론

발전소 온배수를 폐쇄형 해양온도차발전 기화기

증발열원으로 사용시 폐쇄형 해양온도차발전 사이클을 모사하여 성능을 비교하고, 이용 가능한 폐열과의 열교환을 통한 작동유체의 온도 상승이 사이클 효율에 미치는 영향을 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 연중 발전소 온배수는 21°C에서 최대 36°C까지 변화하면서 해양온도차발전의 기화기 증발열원으로서 유효한 열원임을 알 수 있었다.

(2) 총 출력 1 MW에 대해, 기화기로 유입되는 온배수 온도가 증가함에 따라 기화기 내 증발 포화압력이 상승하게 되어 사이클 효율이 증가하였다.

(3) 총 출력 1 MW에 대해, 기화기로 유입되는 온배수 온도가 증가함에 따라 사이클 효율 향상에 따라 필요 냉매 순환량 및 해수 유량은 감소하였다.

(4) 해양 표층수보다 높은 온도 레벨의 주위 이용 가능한 폐열과 터빈으로 유입되는 작동유체를 열교환시켜 터빈으로 유입되는 작동유체 증기의 온도를 상승시킨다면 사이클 효율은 크게 증가할 것이다.

후 기

본 연구결과는 국토해양부가 지원하는 “해양심층수의 다목적 이용개발” 및 자체연구사업 “해역 기초 생산력 증대를 위한 부유식 인공용승시스템 핵심기술 연구” 성과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] A. D’Arsonal, “Utilisation de forces naturelles, Revue Scientifique”, vol. 17, pp. 370-372, 1881.
- [2] G. Claude, “Power from the tropical seas”, Mechanical Engineering, vol. 52, no. 12, pp. 1039-1044, 1990.
- [3] 김광우, “해양온도차 발전 시스템의 소개”, 대한설비공학회지, 제30권, 제1호, pp. 18-25, 2001.
- [4] 홍기용, 현범수, “해양에너지 기술현황과 전망”, 설비저널, 제39권, 제1호, pp. 13-20, 2010.
- [5] H. Uehara, “The experimental research on ocean thermal energy conversion

using the Uehara cycle”, proceedings of the International OTEC/DOWA Conference, pp. 132-141, 1999.

- [6] Korea Power Company, A Study on the Development of Ocean Thermal Energy conversion and Wave Power Generation System, Technical report, KRC-89G-T10, 1989.
- [7] 이호생, 김현주, 윤정인, “해양 심층수를 이용한 냉난방 히트펌프 시스템”, 한국마린엔지니어링학회, 제34권, 제1호, pp. 21-25, 2010.
- [8] 엄지홍, 이재용, 김남진, 김중보, “20 kW급 해양온도차 파이롯 플랜트 성능실험”, 대한설비공학회, 제13권, 제10호, pp. 1002-1009, 2001.
- [9] L. A. Vega, “Ocean thermal energy conversion”, Encyclopedia of Energy Technology and the Environment, pp. 2104-2119, 1995.



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



김현주(金鉉周)

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



이호생(李虎生)

2006년 부경대학교 냉동공조공학과 졸업(공학박사) 2007년 The University of Illinois, ACRC, post-doc 현재 한국해양연구원 해양심층수연구센터 연수연구원