

운전조건에 따른 R744용 해양온도차 발전 사이클의 성능 특성

윤정인¹ · 손창효[†] · 백승문² · 김현주³ · 이호생⁴

(원고접수일 : 2012년 4월 23일, 원고수정일 : 2012년 5월 14일, 심사완료일 : 2012년 6월 14일)

Performance Characteristics of R744 OTEC Power Cycle with Operation Parameters

Jung-In Yoon¹ · Chang-Hyo Son[†] · Seung-Moon Baek² · Hyeon-Ju Kim³ · Ho-Saeng Lee³

요약 : R744용 해양온도차 발전 시스템의 작동변수에 대한 기초 설계자료를 제공하고자 증발열량, 응축열량, 전체일량, 효율에 대한 사이클 성능을 분석하였다. 본 연구에서 고려된 작동변수는 R744 해양온도차 발전 사이클의 과열도, 과냉각도, 응축온도, 증발온도 등이다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다. R744의 증발열량은 과열도와 과냉각도가 증가할수록 증가하는 반면, 응축온도가 증가할수록 감소한다. 전체일량은 R744의 과열도와 과냉각도와 함께 증가하나 증발온도는 증가할수록 감소한다. 그리고 효율은 과열도와 과냉각도가 증가할수록 증가하는 반면, 응축온도는 감소한다. 그러므로 R744용 해양온도차 발전 시스템의 증발열량, 응축열량, 전체일량, 효율은 과열도, 과냉각도, 응축온도, 증발온도, 펌프와 터빈 효율에 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 따라서 R744용 해양온도차 발전 시스템의 설계시에는 이러한 영향을 면밀하게 파악하여야 한다.

주제어 : 이산화탄소, 해양온도차발전, 성능평가

Abstract: In this paper, the cycle performance analysis for condensation and evaporation capacity, total work and efficiency of ocean thermal energy conversion power system using R744 (CO₂) is presented to offer the basic design data for the operating parameters of this system. The operating parameters considered in this study include superheating and subcooling degree, evaporation and condensation temperature, pump and turbine efficiency. The main results were summarized as follows : The evaporation capacity of R744 increases with superheating and subcooling degree, but decreases with the increasing condensation temperature. The total work increases with superheating and subcooling degree of R744, but decreases with the increasing evaporating temperature. And, the efficiency increases with subcooling and superheating degree, but decreases with the increasing condensation temperature. Therefore, superheating and subcooling degree, evaporation and condensation temperature and pump and turbine efficiency of R744 OTEC power system have an effect on the evaporation and condensation capacity, total work and efficiency of this system. With a thorough grasp of these effects, it is necessary to design the OTEC power cycle using R744.

Key words: R744(CO₂), OTEC(Ocean Thermal Energy), Performance analysis

1. 서론

해수와 심해의 차가운 해수의 온도차를 말하는 것
해양에너지 중에서 해양온도차는 표층의 따뜻한 이다. 해양의 표층에서 100m 정도까지의 해수는

[†] 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

태양 에너지의 일부가 열로 축적되며, 저위도 지방에서는 연중 25~30℃ 정도로 유지된다. 한편 극지방에서 냉각된 해수는 해양 대순환에 따라 저위도 지방으로 이동하며, 이동에 따라 주변의 바닷물 사이에 온도차가 발생하여 밀도가 상대적으로 큰 극지방에서 차가운 해수는 심층으로 가라앉게 된다. 따라서 이러한 해양 온도차를 랭킨사이클에 적용하면 터빈으로부터 동력을 얻을 수 있고, 이 동력을 발전기 구동에 사용하면 전기를 생산할 수 있는데, 이러한 기술을 해양온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)이라고 한다[1-2].

현재 일본은 해양온도차 발전시스템의 효율 향상을 위한 새로운 사이클 개발과 담수화 기술개발 등 많은 복합적 연구를 하고 있다. 하지만, 우리나라는 해양온도차 발전에 대한 연구에 미온적인 입장이었다. 그러나 2010년부터 우리나라는 한국해양연구원을 중심으로 산학연 공동연구로 해양온도차 발전시스템 개발에 관심을 가지고 다각적인 연구가 진행되고 있지만, 아직까지는 이와 관련된 연구는 초기 연구단계로서 실용화를 위한 심도 깊은 연구가 필요한 실정이다[3].

기존의 해양온도차 발전시스템에 적용되고 있는 프레온계 냉매는 지구온난화와 오존층 파괴로 인해 향후 더 이상 사용할 수가 없다. 그러므로 이를 대체할 수 있는 대체 냉매의 개발과 적용 가능성에 대한 연구가 절실한 실정이다.

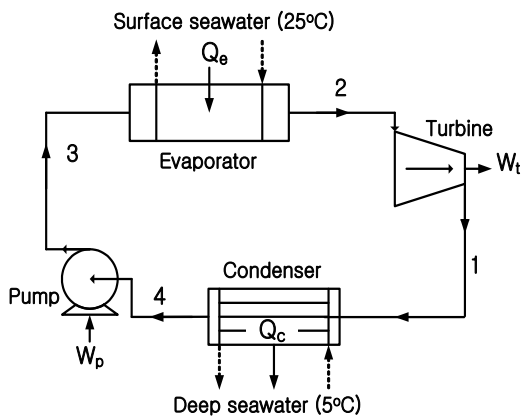


Figure 1: Schematic of R744 OTEC power cycle.

따라서 최근들어 기존 프레온계 냉매의 지구환경문제를 해결할 수 있는 냉매로 거론되고 있는 천연냉매로는 CO₂(R744, 이산화탄소)가 대두되고 있다[4]. 이에 본 논문에서는 EES(Engineering Equation Solver)[5] 프로그램을 이용하여 CO₂ 냉매를 적용한 해양온도차 발전시스템을 모사하고 이를 통해 해양온도차 발전시스템에 대한 기초 설계 자료를 제공하고자 한다. 이를 위해 CO₂ 냉매용 해양 온도차 발전시스템에 영향을 미치는 변수들을 파악한 후, 이러한 인자들에 대한 영향을 분석하였다.

2. 성능분석

본 논문에서 사용되는 R744 냉매의 열역학적 물성치와 성능 분석은 EES 소프트웨어를 이용하여 계산하였다. R744 냉매를 적용한 해양온도차 발전사이클의 성능 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- 열교환기(증발기, 응축기)내의 냉매 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 사이클 내 배관의 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 운동에너지와 위치에너지의 변화는 없는 것으로 가정한다.

Figure 1은 R744를 적용한 해양온도차 발전사이클의 개략도를 나타낸 것이고, Figure 2, 3은 각각 P-h 선도와 T-s 선도를 나타낸 것이다. 그리고 이의 분석에 필요한 식들은 Table 1에 정리하였다. 해양온도차 발전 시스템의 효율은 아래의 식 (1)으로 계산한다.

$$\eta_{otec} = \frac{W}{Q_e} \tag{1}$$

여기서, 전체일량(W)은 터빈일량(W_t)에서 펌프일량(W_p)을 뺀 값이다.

$$W = W_t - W_p \tag{2}$$

그리고 식 (1)에서 증발열량(Q_e)는 Table 1의 값으로 계산하였다.

Table 2에는 본 연구에서 사용되는 해양온도차

발전 시스템의 성능 분석 범위를 나타내었다. Table 2에서 성능 분석범위는 R744용 해양온도차 발전 시스템의 운전조건이다.

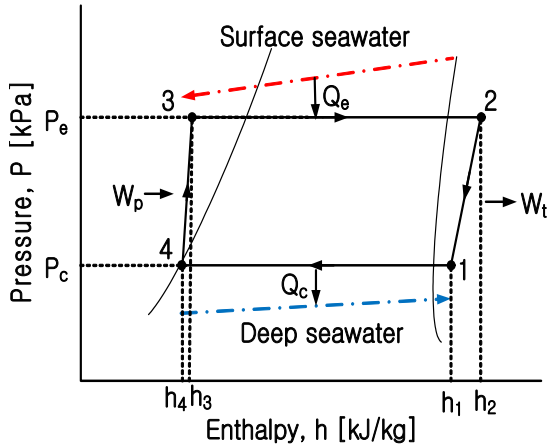


Figure 2: P-h diagram of R744 OTEC power cycle.

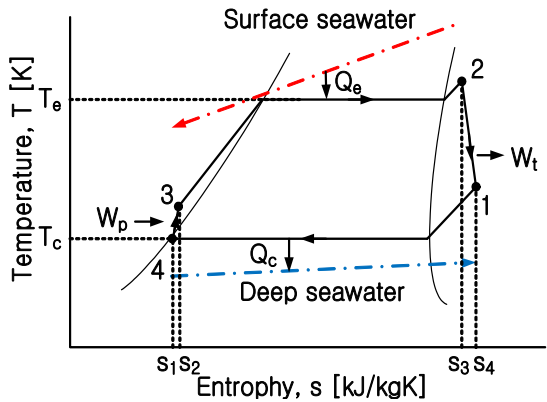


Figure 3: T-s diagram of R744 OTEC power cycle.

Table 1: Energy balance equation of each components of R744 OTEC power cycle.

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

Table 1의 분석조건으로부터 수식과 열물성치값을 계산하고 이렇게 나온 결과값을 이용하여 R744용 해양 온도차 발전 시스템의 증발열량, 응축열량, 터빈일량, 효율에 영향을 미치는 과열도, 과냉각도, 응축온도, 증발온도 등의 인자들에 대해서 살펴보고자 하였다.

Table 2: Analysis range of R744 OTEC power cycle.

Refrigerant	R744(CO ₂)
Condenser temperature, T_c [°C]	5, 10*, 15
Evaporator temperature, T_e [°C]	15, 20*, 25
Superheat temperature, ΔT_{suh} [°C]	0, 5*, 10, 15, 20
Subcooling temperature, ΔT_{suc} [°C]	0, 5*, 10, 15, 20
Mass flow rate m , [kg/s]	0.1
$(T_{ss,in} - T_e)$ [°C]	5
$(T_c - T_{ds,in})$ [°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	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 과열도의 영향

Figure 4는 증발기 출구 과열도(ΔT_{suh}) 변화에 따른 R744용 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 전체일량, 효율을 나타낸 것이다. Figure 4에서 알 수 있는 것처럼 증발기 출구 과열도가 증가할수록 증발열량, 응축열량, 압축일량이 증가하였다. 이는 Figure 2에서 알 수 있듯이, 과열도가 증가할수록 증발기 입출구 엔탈피차가 증가하기 때문에 증발열량은 증가한다. 그리고 과열도가 증가할수록 터빈입구 엔탈피가 증가하기 때문에 터빈일량은 증가하게 된다. 응축열량은 응축기 입구의 엔탈피가 증가하기 때문이다. 해양온도차 발전 시스템의 효율은 위의 결과와 식 (1)로부터, 과열도가 증가할수록 증발열량이 전체 일량 보다 훨씬 많이 증가하기 때문에 효율은 감소한다.

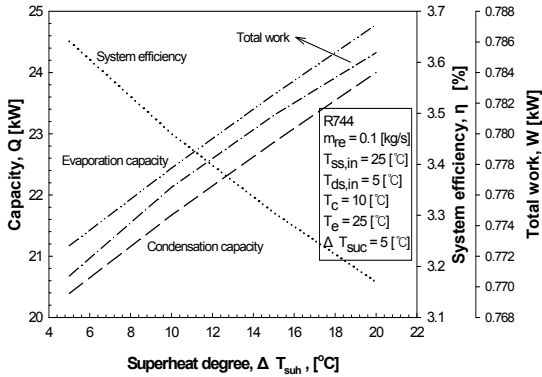


Figure 4: Performance characteristics of R744 OTEC power cycle with superheating degrees.

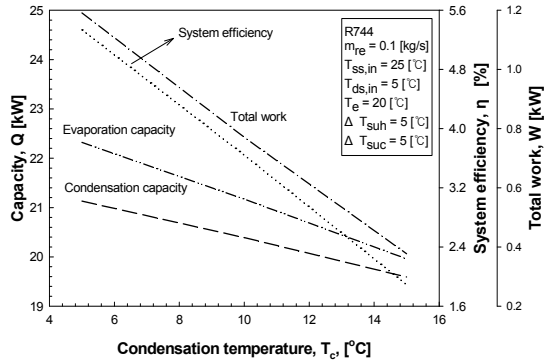


Figure 6: Performance characteristics of R744 OTEC power cycle with condensation temperatures.

3.2 과냉각도의 영향

Figure 5는 응축기 출구 과냉각도(ΔT_{suc}) 변화에 따른 R744용 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 전체일량, 효율을 나타낸 것이다. Figure 5에 나타난 것처럼, Figure 2의 P-h 선도상에서 과냉각도가 증가할수록 응축기 출구 엔탈피가 감소하여 응축열량은 증가한다. 그리고 증발열량은 증발기 입구 엔탈피가 감소하기 때문에 증가한다. 또한 전체 일량은 증가하게 되는데, 이는 펌프 일량은 일정한 반면 터빈일량이 증가하기 때문이다. 따라서 전체 시스템의 효율은 위의 결과로부터 증가하게 된다.

3.3 응축온도의 영향

Figure 6은 응축온도(T_c) 변화에 따른 R744용 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 전체 일량, 효율을 나타낸 것이다. Figure 6에서 알 수 있는 것처럼, 응축온도가 증가할수록 응축기 입출구 엔탈피차가 감소하기 때문에 응축열량은 감소한다. 그리고 응축온도가 증가할수록 증발기 입구 엔탈피가 증가하므로 증발열량은 감소한다. 또한 터빈일량은 증발과 응축압력비(압축비)의 감소로 인해 감소하게 된다. 따라서 효율은 위의 결과로부터 응축온도가 증가할수록 감소하게 된다.

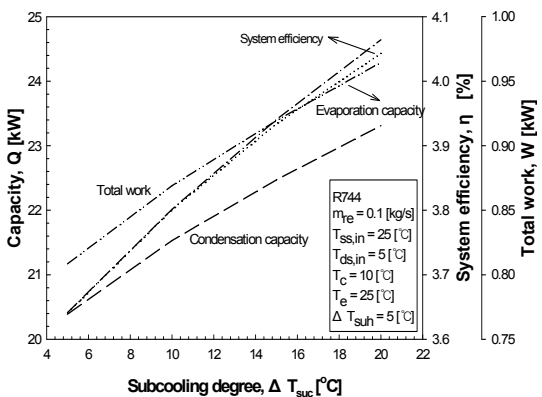


Figure 5: Performance characteristics of R744 OTEC power cycle with subcooling degrees.

3.4 증발온도의 영향

Figure 7은 증발온도(T_e) 변화에 따른 R744용 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 전

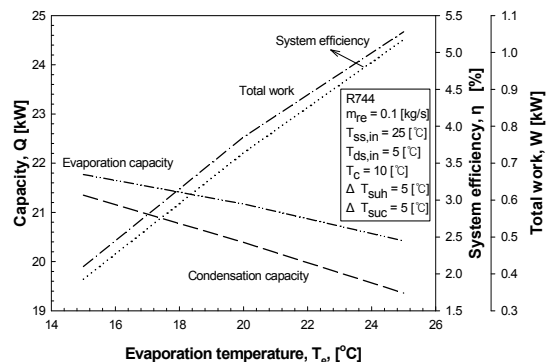


Figure 7: Performance characteristics of R744 OTEC power cycle with evaporation temperatures.

체일량, 효율을 나타낸 것이다. Figure 7에서 증발온도가 증가할수록 증발기 입출구 엔탈피차가 감소하기 때문에 증발열량은 감소한다. 그리고 증발온도가 증가할수록 증발과 응축의 압축비가 증가하기 때문에 터빈일량은 증가하고 이로 인해 전체일량은 증가하게 된다. 또한 증발온도가 증가할수록 응축기 출구 엔탈피가 감소하기 때문에 응축열량도 감소하게 된다. 따라서 위의 결과로부터 해양온도차 발전시스템의 효율은 전체적으로 증가하게 된다.

3.5 터빈효율의 영향

Figure 8은 터빈효율(η_t) 변화에 따른 R744용 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 전체

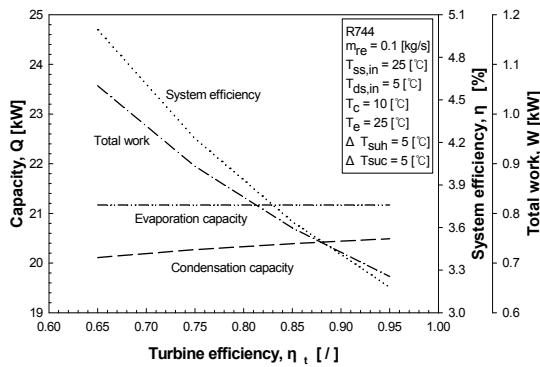


Figure 8: Performance characteristics of R744 OTEC power cycle with turbine efficiencies.

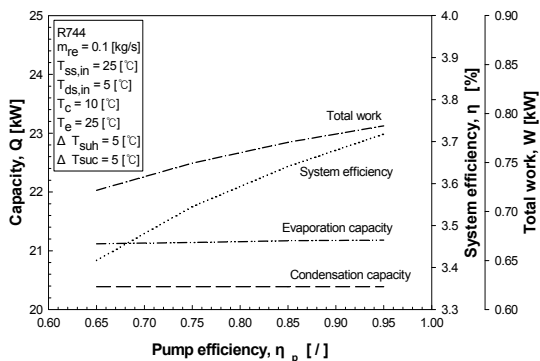


Figure 9: Performance characteristics of R744 OTEC power cycle with pump efficiencies.

일량, 효율을 나타낸 것이다. Figure 8에서 알 수 있듯이 터빈효율이 증가할수록 터빈일량이 감소하므로 전체일량은 감소한다. 증발열량은 터빈효율과 무관하기 때문에 일정하다. 그리고 응축열량은 터빈효율이 증가할수록 응축기 입구 엔탈피가 증가하기 때문에 증가한다. 따라서 해양온도차 발전시스템의 전체 효율은 감소하게 된다.

3.6 펌프효율의 영향

Figure 9는 펌프효율(η_p) 변화에 따른 R744용 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 전체 일량, 효율을 나타낸 것이다. Figure 9에서 펌프효율이 증가할수록 펌프일량이 감소하기 때문에 전체 일량은 증가하고, 증발열량과 응축열량은 펌프효율과 무관하기 때문에 거의 일정하다. 따라서 위의 결과로부터 해양온도차 발전 사이클의 전체 효율은 펌프효율과 함께 증가한다.

4. 결론

R744용 해양온도차 발전 시스템의 증발열량, 응축열량, 전체일량, 효율에 영향을 미치는 과열도 (ΔT_{suh}), 과냉각도 (ΔT_{suc}), 응축온도 (T_c), 증발온도 (T_e) 등의 인자들에 대해서 Table 2의 운전조건에서 살펴보았다.

(1) 증발열량에 대한 과열도, 과냉각도, 증발온도, 응축온도, 터빈효율, 펌프효율의 영향을 살펴보면, 우선 과열도, 과냉각도, 증발온도가 증가할수록 증발열량은 증가하는 반면, 응축온도가 증가할수록 증발열량은 감소한다. 그리고 터빈효율과 펌프효율과는 무관하게 증발열량은 일정하다.

(2) 응축열량에 대한 과열도, 과냉각도, 증발온도, 응축온도, 터빈효율, 펌프효율의 영향을 살펴보면, 우선 과열도, 과냉각도, 터빈효율이 증가할수록 응축열량은 증가하는 반면, 응축온도와 증발온도가 증가할수록 증발열량은 감소한다. 그리고 펌프효율과는 무관하게 응축열량은 일정하다.

(3) 전체일량에 대한 과열도, 과냉각도, 증발온도, 응축온도, 터빈효율, 펌프효율의 영향을 살펴보면, 우선 과열도, 과냉각도, 증발온도, 터빈효율이 증가할수록 전체일량은 증가하는 반면, 응축온도와

터빈효율이 증가할수록 전체일량은 감소한다.

(4) 효율에 대한 과열도, 과냉각도, 증발온도, 응축온도, 터빈효율, 펌프효율의 영향을 살펴보면, 우선 과열도, 과냉각도, 증발온도, 터빈효율이 증가할수록 효율은 증가하는 반면, 응축온도와 터빈효율이 증가할수록 효율은 감소한다.

(5) 위의 결과로부터 R744를 냉매로 사용하는 해양온도차 발전 사이클의 증발열량, 응축열량, 전체일량, 효율에 과열도, 과냉각도, 증발온도, 응축온도 등에 영향을 받는다는 것을 알 수 있었고, 이러한 영향들을 잘 파악하여 R744용 해양온도차 발전 사이클을 설계할 필요가 있음을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- [1] 홍기용, 현범수, “해양에너지기술현황과전망”, 설비저널, 제30권, 제1호, pp. 13-20, 2010.
- [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 88, pp. 2740-2754, 2011.
- [3] H. S. Lee, D. H. Jung, S. W. Hong and H. J. Kim, “Performance analysis of closed-type OTEC cycle using waste heat,” Journal of The Korean Society of Ocean Engineers vol. 25, no. 1, pp. 80-84, 2011.
- [4] C. H. Son and H. K. Oh, “Heat exchanger of heat pump using CO₂,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 32, no. 1, pp. 10-14, 2008.
- [5] EES: Engineering Equation Solver, 2006. fChart Software Inc.