

해양온도차발전 Closed and Regeneration Cycle의 기본 정특성

차상원¹ · 김유택[†] · 모장오² · 임태우³ · 이영호⁴

(원고접수일 : 2012년 10월 4일, 원고수정일 : 2012년 11월 5일, 심사완료일 : 2012년 11월 23일)

Basic Static Characteristics of a Closed and a Regeneration Cycles for the OTEC System

Sang-Won Cha¹ · You-Taek Kim[†] · Jang-Oh Mo² · Tae-Woo Lim³ · Young-Ho Lee⁴

요 약 : OTEC기술은 신재생에너지 기술 중의 하나로 따뜻한 표층수와 차가운 심층수의 온도차를 이용하여 전력을 생산하는 기술이다. 작동유체의 선정과 OTEC 사이클의 상태에 따라 에너지효율과 환경적인 측면에 많은 영향을 준다. OTEC의 작동유체로는 ammonia, R22, R407C, R410A가 있다. 본 논문에서는 OTEC 시스템의 최적화를 위해 25℃에서의 증발압력을 비교하였다. 또한 밀폐사이클과 재생사이클에서의 작동유체에 따른 출력과 효율에 대하여 연구하였다.

주제어 : 해양온도차발전, 작동 사이클, 밀폐 사이클, 재생 사이클

Abstract: Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) technology is one of the new and renewable energy that utilizes the natural temperature gradient that exists in the tropical ocean between warm surface water and the deep cold water, to generate electricity. The selection of working fluid and the OTEC cycle greatly influence the effect on the system operation, and it's energy efficiency and impacts on the environment. Working fluids of the OTEC are ammonia, R22, R407C, and R410A. In this paper, we compared boiling pressure to optimize OTEC system at 25℃. Also, this paper showed net-power and efficiency according to working fluids for closed cycle and regeneration cycle.

Key words: OTEC, Working cycle, Closed cycle, Regeneration cycle

1. 서 론

전 세계적으로 화석연료가 고갈되어감에 따라 최근에 신재생에너지에 대한 관심이 커지고 있다. 신재생에너지로는 태양광, 풍력, 해양에너지, 지열 등이 있다. 그 중에서 해양에너지로는 조류, 조력, 파력, 해양온도차 등이 있다. 여기서 해양에너지는 기존의 화석 연료나 원자력 에너지원과는 달리 공해가 전혀 없으며, 또한 그 양이 막대하여 거의 무한대로 사용이 가능하다는 장점이 있다. 그 중 하

나가 해양온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion)이다. OTEC이란 해수의 표층수와 심층수의 온도차이를 이용하여 발전을 하는 기술이다 [1,2].

표층수의 열원으로 작동유체를 증발시키고, 심층수의 열원으로 작동유체를 응축시키게 되는데, 작동유체로는 유기물(Organic)를 사용한다. 작동유체는 펌프를 통해 승압되고, 증발기를 지나가면서 증발하게 된다. 기체로 팽창한 작동유체는 터빈을

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail: kimyt@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4258)

1 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 E-mail: musicmaker0722@gmail.com, Tel: 051-410-4862

2 호주 University of Adelaide 방문연구원 E-mail: leglong97@hanmail.net, Tel: 070-4001-6182

3 한국해양대학교 기관공학부 E-mail: kyunlim@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4256

4 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부 E-mail: lyh@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4293

으로 되어있다.

R407C는 R32 23%와 R125 25%, R134a 52%의 비공비 혼합물이다. 이는 안전도가 높으며 상 변화시 온도변화가 7℃ 정도가 되어 대향류방식의 냉각기를 사용하면 조금 더 효과적이다. 그리고, 상 변화시 열원유체 온도와 냉매온도를 일정하게 유지할 수 있으므로 유효에너지 손실을 절감할 수 있다. 현재 R22의 대체 냉매로써 주목받고 있다[7].

R410A는 R32 50%, R134a 50%의 조성비로 혼합한 물질이며, 비공비혼합물에 속한다. 이 물질은 상대적으로 상변화시 온도변화가 적어 공비혼합물과 거의 유사하여 근 공비혼합물 냉매라고도 한다. 그리고, 안전도가 높아서 R22보다 약 40% 정도 높은 포화압력을 가지고, 성적계수(COP)는 R22보다는 약간 낮다. R410A는 R22를 대신하여 사용했을 때 응축기나 증발기에 거의 영향을 미치지 않는 장점이 있어서 중, 소형 상업용 냉동기 냉매로 이용되고 있다[8,9].

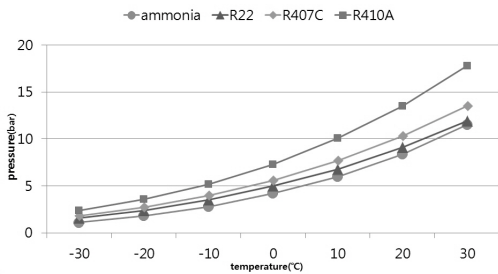


Figure 3: Boiling pressure(bar) due to working fluids

위에서 언급한 암모니아, R22, R407C, R410A의 상온 25℃에서의 증발압력을 비교하였다. Figure 3은 작동유체에 따른 증발압력이다. 암모니아를 기준으로 했을 때 R22, R407C, R410A의 압력 변화가 비슷한 것을 볼 수 있다.

그리고, R22와 R407C의 경우에는 거의 비슷한 압력을 보이고 있고, R410A는 30~40%정도 높은 것을 알 수 있다. 이를 보면 R407C를 사용할 경우 R22와 비슷한 증발압력으로 터빈의 설계요건이 비슷하다. 하지만 R410A는 증발압력이 높기 때문에 이를 고려하여 설계할 필요성이 있다. 이를 바탕으로 열역학적인 성질, 환경적인 측면, 안정성을 고려해 암모니아, R22, R407C, R410A에 대한시뮬레

이션을 수행하여 적합성을 연구하였다.

3. 정특성 시뮬레이션

OTEC의 시스템을 구성할 때에 중요한 요소 중에 하나가 작동유체이다. 사이클에서 어떤 작동유체를 사용하느냐에 따라서 시스템의 출력과 효율이 변하게 되고, 안정성도 고려하게 된다. 이 중에서 작동유체에 따른 출력과 효율에 대하여 정특성을 통해 비교분석 하였다.

3.1 작동유체에 따른 사이클 출력 및 효율

정특성은 밀폐사이클을 기본 사이클로 선택하였고 기본 조건은 Table 1과 같이 정하여 모든 열손실은 없다고 가정하였다. 사이클의 효율은 다음의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. q_{in} 은 열교환기에서 유입된 열원이며 W_{out} 은 터빈에서 얻은 출력, W_{in} 은 펌프에서 사용한 출력을 의미한다.

$$\eta_{th} = \frac{W_{out} - W_{in}}{q_{in}} \quad (1)$$

Table 1: Simulation boundary conditions

Cold S.W(flow)	130[kg/s]
Cold S.W(temperature)	4[°C]
Warm S.W(flow)	110[kg/s]
Warm S.W(temperature)	28[°C]
Turbine Efficiency	85[%]
Pump Efficiency	85[%]
Pump ΔP	1.0[bar]
Evaporator ΔP	1.8[bar]
Pump ΔP	3.8[bar]
Turbine ΔP	1.8[bar]
Heat Exchanger Type	Shell & Tube

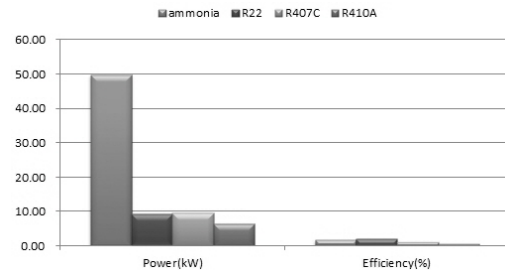


Figure 4: The output power and efficiency of the working fluids at the same conditions

Figure 4는 작동유체에 따른 사이클의 출력과 효율을 보인다. 출력은 암모니아가 가장 크다. 그 이유는 열용량이 다른 냉매에 비해 가장 뛰어나기 때문에 같은 유량에서 가장 큰 출력을 보인다. net 효율을 비교하면 R22가 2.05%로 가장 좋았다. 하지만 이 두 냉매는 앞에서 언급한 대로 사용에 단점이 많은 냉매이다. R407C와 R410A는 규제대상이 아니며 안정한 작동유체이며, 출력과 효율에서 우선 고려대상이 될 수 있는 냉매로 판단된다.

3.2 밀폐 사이클의 출력 및 효율

OTEC 시스템에서 각각의 작동유체에서 터빈의 입구 압력에 따라 사이클 출력과 효율이 달라질 수 있다. 기본조건으로는 Table 1과 같은 조건을 사용 하였으며, 표층수 온도의 경우는 높을수록 효율이 가장 좋기 때문에 이를 고려하여 28℃로 설정하여 밀폐사이클에서 각 각의 작동유체와 터빈의 입구 압력에 따른 특성을 비교분석 하였다.

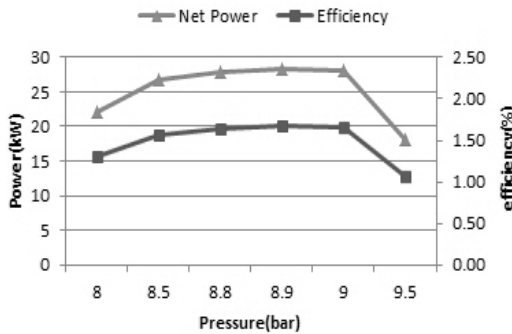


Figure 5: Characteristics according to the turbine inlet pressure at closed cycle (ammonia)

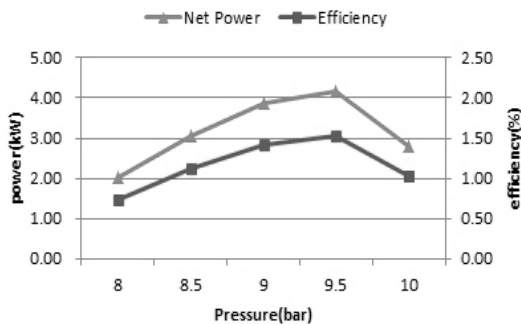


Figure 6: Characteristics according to the turbine inlet pressure at closed cycle (R22)

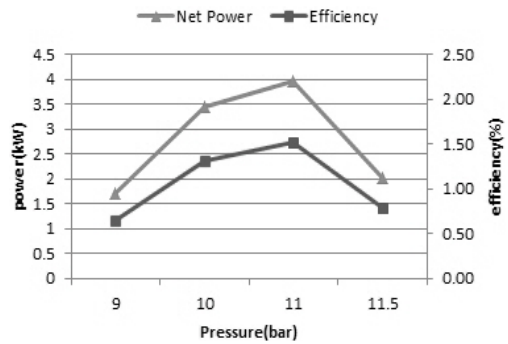


Figure 7: Characteristics according to the turbine inlet pressure at closed cycle (R407C)

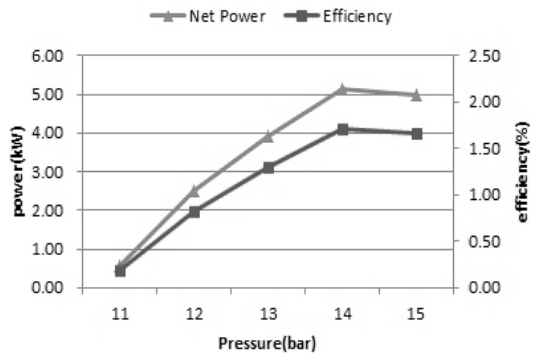


Figure 8: Characteristics according to the turbine inlet pressure at closed cycle (R410A)

Figure 5는 작동유체를 암모니아로 사용하여 터빈의 입구 압력에 따른 사이클의 출력과 효율을 보여주고 있다. 터빈 입구압력이 8.9bar일 때에 가장 높은 출력인 28.34 kW와 1.67%의 효율을 보인다.

Figure 6은 작동유체로 R22를 사용한 그래프이다. R-22의 경우에는 터빈의 입구압력이 9.5bar일 때 4.15kW의 출력과 1.53%의 효율을 나타낸다.

Figure 7은 작동유체로 R407C를 사용했을 때의 그래프이다. R407C는 터빈의 입구압력이 11bar일 때 3.96kW의 출력과 1.53%의 효율을 보이고 있다.

Figure 8은 작동유체로 R410A를 사용하였을 때 성능 그래프이다. R410A는 터빈의 입구압력이 14bar일 때에 출력이 5.13kW 그리고 효율이 1.71%를 나타내었다. 이상의 결과로부터 밀폐사이클에서 작동유체를 사용할 때 터빈의 입구 압력은 포화압력을 사용하는 것 보다는 포화압력보다 0.5~1.0bar 낮은

압력에서 사용하는 것이 출력과 효율에서 유리함을 알 수 있다. 또한 R22의 대체 냉매로써 R407C와 R410A가 출력과 효율에서 충분히 사용가능한 점을 확인할 수 있다.

3.3 재생사이클의 출력 및 효율

기본조건으로는 Table 1과 같은 조건을 사용하였으며, 표층수 온도의 경우는 높을수록 효율이 가장 좋기 때문에 이를 고려하여 28℃로 설정하여 재생사이클에서 각 각의 작동유체와 터빈의 입구압력에 따른 시뮬레이션을 비교분석 하였다.

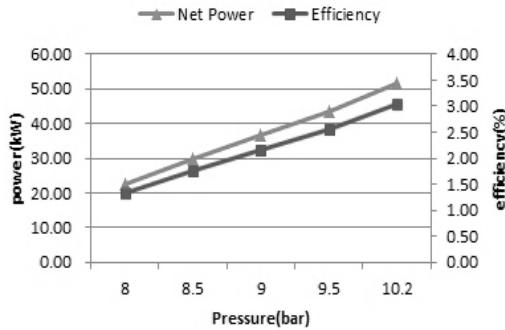


Figure 9: Characteristics according to the turbine inlet pressure at regeneration cycle(ammonia)

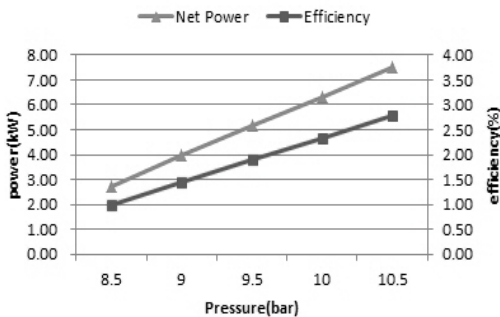


Figure 10: Characteristics according to the turbine inlet pressure at regeneration cycle(R22)

Figure 9는 작동유체로 암모니아를 사용하여 터빈의 입구 압력에 따른 사이클의 출력과 효율을 보여주고 있다. 터빈 입구압력이 10.2bar일 때에 가장 높은 출력인 51.63kW와 3.05%의 효율을 보이고 있다. Figure 10은 작동유체로 R22를 사용한 그

래프이다. R22의 경우에는 터빈의 입구압력이 10.5bar일 때 7.5kW의 출력과 2.78%의 효율을 나타낸다.

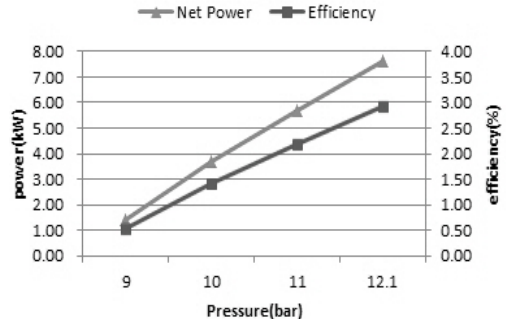


Figure 11: Characteristics according to the turbine inlet pressure at regeneration cycle(R407C)

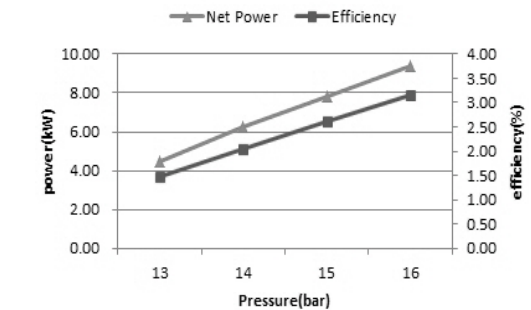


Figure 12: Characteristics according to the turbine inlet pressure at regeneration cycle(R410A)

Figure 11은 작동유체로 R407C를 사용했을 때의 결과이다. R407C는 터빈의 입구압력이 12.1bar일 때 7.61kW의 출력과 2.93%의 효율을 보이고 있다. Figure 12는 작동유체로 R-410A를 사용하였을 때의 성능 그래프이다. R-410A는 터빈의 입구압력이 16bar일 때에 출력이 9.39kW그리고 효율이 3.14%를 나타내었다.

이상의 결과로부터 재생사이클에서는 작동유체를 사용할 때의 터빈 입구압력이 포화압력일 때에 출력과 효율이 가장 좋게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 그리고 재생사이클에서도 R22의 대체냉매로 R407C, R410A를 출력과 효율을 보았을 때 충분히 사용가능하다는 것을 알 수 있다.

3.4 밀폐사이클과 재생사이클의 출력 및 효율

Figure 13은 밀폐사이클과 재생사이클의 작동유체에 따른 출력을 보여준다. 출력은 암모니아가 가장 큰 것을 알 수 있다. 같은 유량에서 큰 출력을 얻으려면 사이클에 상관없이 암모니아가 유리하다. 그리고, 밀폐사이클보다는 재생사이클이 전체적으로 출력이 높은 것을 알 수 있다.

Figure 14는 밀폐사이클과 재생사이클의 작동유체에 따른 사이클효율을 보여준다. 작동유체 중 R410A가 사이클에 상관없이 가장 높은 효율을 나타내고 있다. R410A의 경우는 R22의 대체냉매로 고려되고 있는 냉매로 더 많은 연구가 진행되어야 할 것이다. 그리고, 밀폐사이클 보다는 재생사이클이 효율면에서 좋은 것을 알 수 있다.

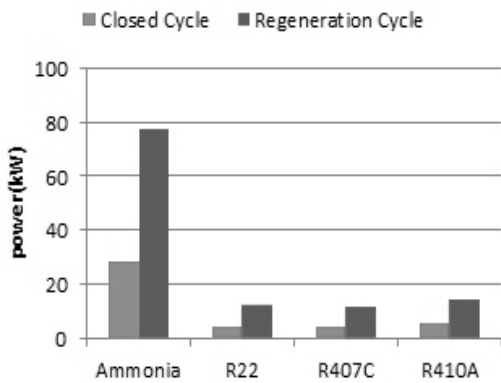


Figure 13: Net power characteristics according to the turbine inlet pressure

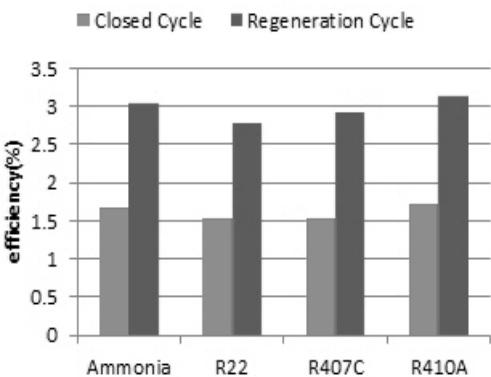


Figure 14: Efficiency characteristics according to the turbine inlet pressure

위의 결과로부터 작동사이클은 재생사이클이 출력과 효율면에서 좋은 것을 알 수 있고, 작동유체로는 출력을 고려했을 때에는 암모니아, 효율을 고려할 때에는 R410A가 적합한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 OTEC 시스템에 사용되고 있는 작동유체인 암모니아와 R22외에 주목받고 있는 R407C, R410A의 특성을 비교분석하고, 밀폐사이클과 재생사이클의 출력과 효율을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 기본조건에서 작동 유체에 따른 출력과 효율을 비교하면 암모니아가 출력이 가장 크며, 효율은 R22가 가장 높았다.
- (2) Turbine 입구 압력에 따른 사이클의 출력과 효율을 비교하면 밀폐사이클 및 재생사이클 모두 출력은 암모니아가 가장 좋았으며, 효율은 R410A가 가장 좋았다.
- (3) 밀폐사이클은 포화압력보다 낮은 압력에서 출력과 효율이 높았고, 재생사이클은 포화압력에서의 출력과 효율이 가장 좋았다.
- (4) 밀폐사이클보다 재생사이클이 출력이 더 크고 약 2배정도 더 높은 사이클 효율을 보였다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP, 해수온도차발전(OTEC) 효율향상을 위한 작동유체 선정과 요소기술 개발) (No.2010T100101102) 및 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력양성 사업의 연구결과이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

[1] Sang-Won Cha, You-Tack Kim and Young-Ho Lee, "A study on the basic characteristic analysis of OTEC's cycle", The 8th KSME-JSME(The Korea Society of Mechanical Engineers - The Japan Society of Mechanical Engineers), FR03-015, pp. 1-4, 2012.

- [2] Jang-Oh Mo, You-Taek Kim and Mann-Eung Kim et al., “Performance analysis by CFD and aerodynamic design of 100kW class radial turbine using waste heat from ship.” The Korean Society of Marine Engineering, vol. 25, no. 2, pp. 175-181, 2011.
- [3] Jang-Oh Mo, You-Taek Kim and Cheol Oh et al., “Influence of performance and internal flow of a radial inflow turbine with variation of vane nozzle exit angles.” The Korean Society of Marine Engineering, vol. 35, no. 6, pp. 757-764, 2011.
- [4] Tae-Bum Seo, “Introduction of the OTEC”, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, vol. 30, no. 1, pp. 18-24, 2011.
- [5] Tae-Guk Kim, Thermal System Design and Simulation, Intervision, Korea, 2000.
- [6] Aspen HYSYS Operation Guide, Aspentech, USA
- [7] Nam-Jin Kim, Sang-Ho Shin and won-kee Chun, “A Study on the thermodynamic cycle of OTEC system”, Journal of The Korean Solar Energy Society, vol. 26, no.2, pp. 9-18, 2006 (in Korean).
- [8] Ho-Saeng Lee, Hyeon-Ju Kim, Dong-Ho Jung et al., “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).
- [9] Sang-Kon Choi, Refrigeration Engineering, Kun Ki Won, 2009 (in Seoul).