

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 3, 2007

원자력발전소 온배수를 이용한 해양 온도차발전 사이클 해석

김남진*, 전용한**, 김종보***

*제주대학교 에너지공학과(jnkim@cheju.ac.kr), **인하대학교 기계공학과(kcv79@hanmail.net),
***인하대학교 기계공학과(cbkim@inha.ac.kr)

Cycle Simulation on OTEC System using the Condenser Effluent from Nuclear Power Plant

Kim, Nam-Jin*, Jeon, Young-Han**, Kim, Chong-Bo***

*Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Cheju National University(jnkim@cheju.ac.kr),

**Dept. of Mechanical Engineering, Inha University(kcv79@hanmail.net),

***Dept. of Mechanical Engineering, Inha University(cbkim@inha.ac.kr)

Abstract

For the past few years, the concern for clean energy has been greatly increased. Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) power plants are studied as a viable option for the supply of clean energy. In this paper, the thermodynamic performance of OTEC cycle was examined. Computer simulation programs were developed under the same condition and various working fluids for closed Rankine cycle, regeneration cycle, Kalina cycle, open cycle and hybrid cycle. The results show that the regeneration cycle using R125 showed a 0.17 to 1.56% increase in energy efficiency, and simple Rankine cycle can generate electricity when the difference in warm and cold sea water inlet temperatures are greater than 15°C. Also, the cycle efficiency of OTEC power plant using the condenser effluent from nuclear power plant instead of the surface water increased about 2%.

Keywords : 해양온도차발전(OTEC), 랭킨 사이클(Rankine cycle), 온배수(Condenser effluent), 심층수(Deep water), 표층수(Surface water)

1. 서 론

현재 인류는 심각한 에너지와 환경 문제에 직면하고 있기 때문에 환경에 무해하고 재생이 가능한

에너지를 필요로 하고 있다. 이러한 에너지원 중, 실제 이용가능한 것이 해양에너지이며 이를 이용하여 발전하는 시스템을 해양 온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)이라고

접수일자 : 2007년 6월 4일, 심사완료일자:2007년 8월 20일

교신저자 : 김남진(jnkim@cheju.ac.kr)

한다.¹⁾ 따라서 OTEC 발전 시스템에 대한 연구가 미국과 일본을 중심으로 1970년대 이후 꾸준히 진행되어 오고 있다. 그 결과 미국 하와이에서 OTEC 발전 시스템의 성능시험을 수행한 결과 213 kW의 전기를 생산하였고, 일본에서는 구주의 사가대학이 R22와 암모니아를 작동유체로 사용하는 75kW 출력의 OTEC 발전 시스템을 갖추고 연구를 진행하고 있다. 그러나 OTEC 발전 시스템 설치에 소비되는 막대한 비용과 신뢰성 있는 데이터의 부족으로 인해서 OTEC 발전 시스템의 상업화가 이루어지지 못하고 있다.^{2,3)} 더욱이 작동유체로 연구되고 있는 암모니아는 독성문제로 인하여 R22가 제안되고 있지만 몬트리올 의정서에 의해서 사용금지 될 것이기 때문에 이를 대체할 수 있는 작동유체에 대한 연구가 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 해양 온도차 발전 시스템에 사용될 가장 적합한 작동유체를 찾아 단순 랭킨 사이클, 재생식 랭킨 사이클, 칼리나 사이클, 혼합형 사이클의 효율과 비교 분석하여 최적의 사이클을 찾고, 표층수 대신 동해안 지역의 원자력 발전소 온배수 조건을 이용하여 각 계절별로 OTEC 발전 시스템의 효율을 구하여 그 가능성을 검토하고자 한다.

2. OTEC 시스템 사이클

2.1 단순 랭킨 사이클

그림 1은 단순 랭킨 사이클을 이용한 OTEC 발전시스템의 개략도이다. 1번 상태에서 과냉액체가 증발기에 들어가며 유체가 표층수와 열교환으로 증발이 일어나 과열증기상태로 나오게 된다. 이 증기는 터빈을 가동시킨 후 2상 상태가 되어 응축기로 유입된 후 심층수와 열교환으로 대부분이 과냉된 상태로 나오게 되며 펌프에 의해 압력이 상승하여 증발기로 다시 들어가게 된다.

2.2 재생식 랭킨 사이클

그림 2는 재생식 랭킨 사이클의 개략도이다. 이 사이클은 단순 랭킨 사이클과 유사하지만, 터빈으로 들어간 증기의 일부분을 중간 단계에서 추출한 뒤 개방형 급수 가열기를 통과하여 증발기에 들어가는 작동유체를 미리 가열하는 것만 다르다. 따라서 단순 랭킨 사이클에 비해 개방형 급수 가열기와 펌프가 추가적으로 필요하다.

2.3 칼리나 사이클

그림 3은 칼리나 사이클을 이용한 OTEC 발전 시스템의 개략도이다. 칼리나 사이클은 단순 랭킨 사이클에 분류기, 재생기, 팽창밸브, 혼합기가 추

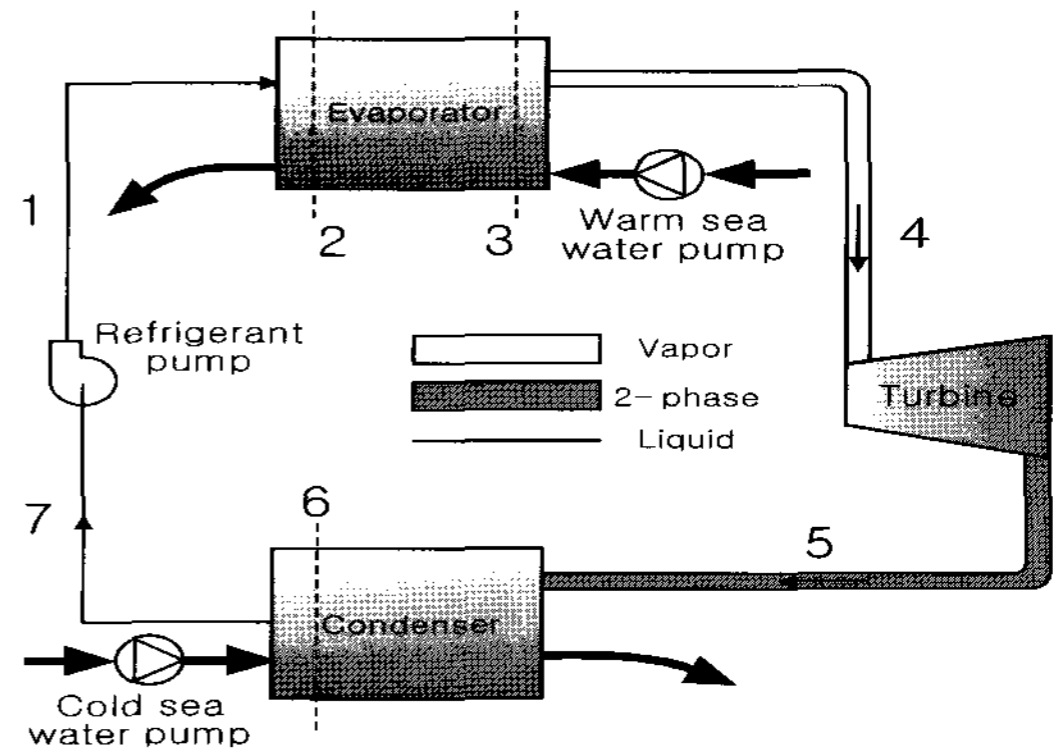


그림 1. 단순 랭킨 사이클 개요도

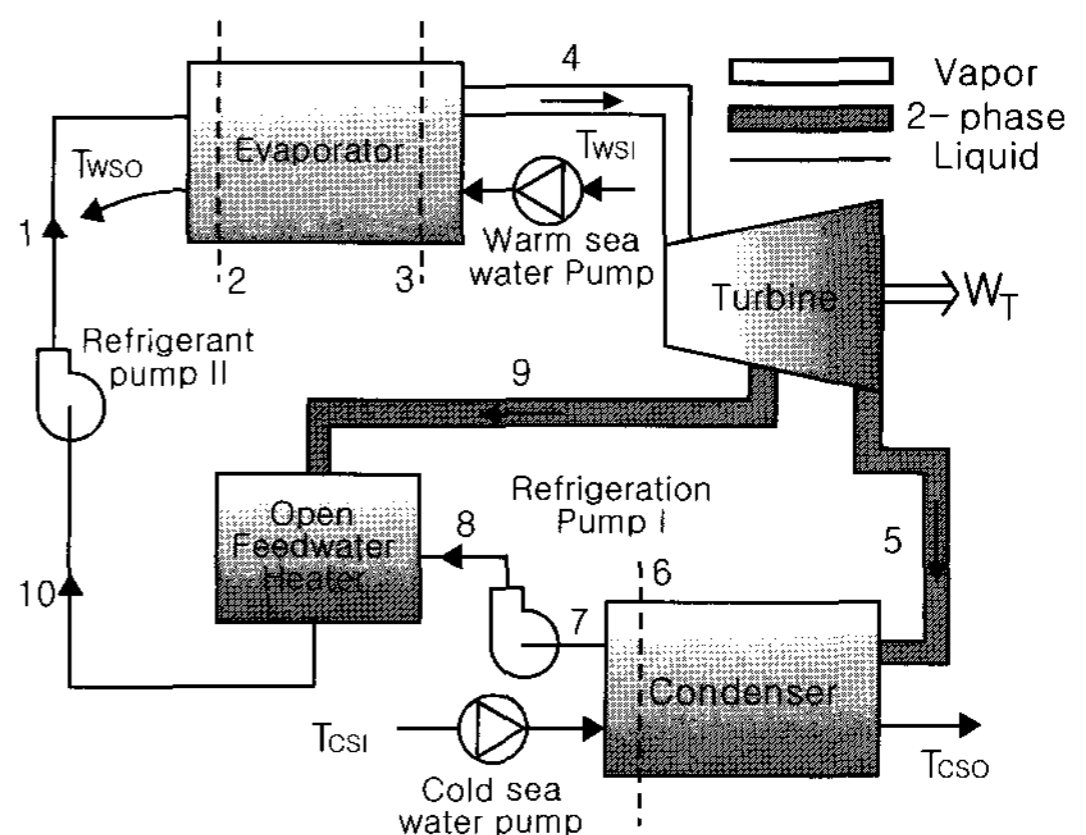


그림 2. 재생식 랭킨 사이클 개요도

가된 시스템이다. 그림에서 실선은 액체의 흐름을 나타내고 굵은선은 증기 또는 2상 상태의 흐름을 나타낸다. 칼리나 사이클의 작동원리는 다음과 같다. 재생기내에서 열교환을 마친 액상의 암모니아-물 혼합물은 증발기내로 유입되어 따뜻한 표층수와 열교환하여 암모니아는 증발하게 된다. 이렇게 증발한 증기혼합물은 분류기내에서 포화증기와 포화액으로 분리되어진다. 이때 분리된 포화증기는 터빈을 가동시킨 뒤 단열된 혼합기로 유입된다. 한편, 분류기로부터 분리되어진 고온의 포화액은 재생기내에서 증발기로 유입되는 과냉액 상태의 암모니아-물 혼합물과 열교환을 한 후 흡수기로 유입되기 전에 팽창밸브를 거친다. 흡수기에서 합쳐진 2상 상태의 혼합물은 응축기내에서 심층수와 열교환을 통하여 포화액 상태가 된 후, 펌프에 의해 재생기에 유입되어 사이클을 완성하게 된다.⁴⁾

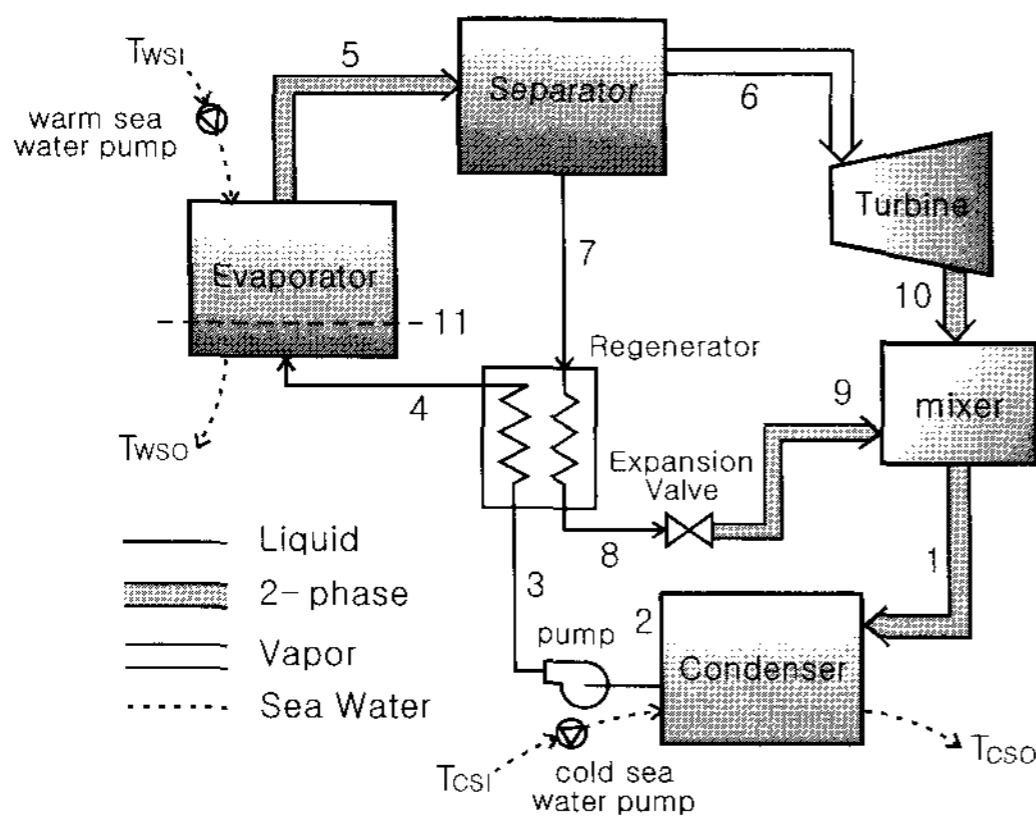


그림 3. 칼리나 사이클 개요도

2.4 개방형 사이클

그림 4는 개방형 사이클의 개략도이다. 이 사이클은 다른 사이클과는 달리 해수자체를 작동유체로 사용한다. 유입유체가 증기압 이하로 유지되는 기화기에서 순간적으로 기화되어 터빈을 통해 팽창한 후 응축된다. 본 연구에서 고려한 응축기는 담수생산을 고려하기 위해 간접접촉열교환 방식을

채택하였다.

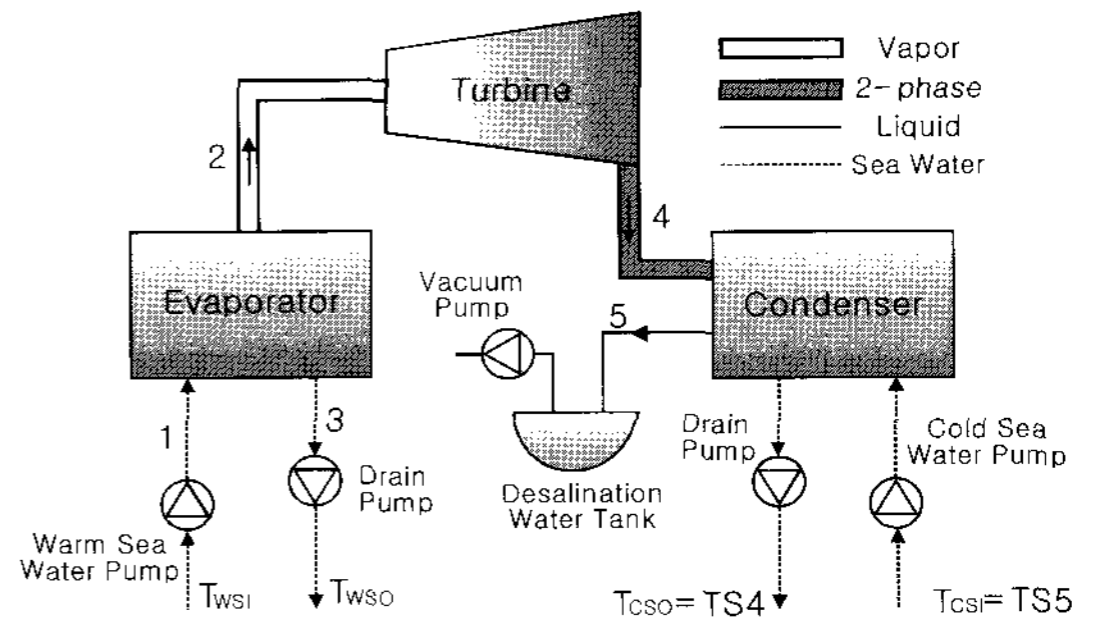


그림 4. 개방형 사이클 개요도

2.5 혼합형 사이클

그림 5와 같이 혼합형 사이클은 담수생산과 효율향상을 동시에 이루기 위해 만들어진 것으로, 따뜻한 표층수가 증발기내에서 작동유체와 열교환을 한 후 기화기에 유입되어 담수를 생산하는 사이클을 말한다.

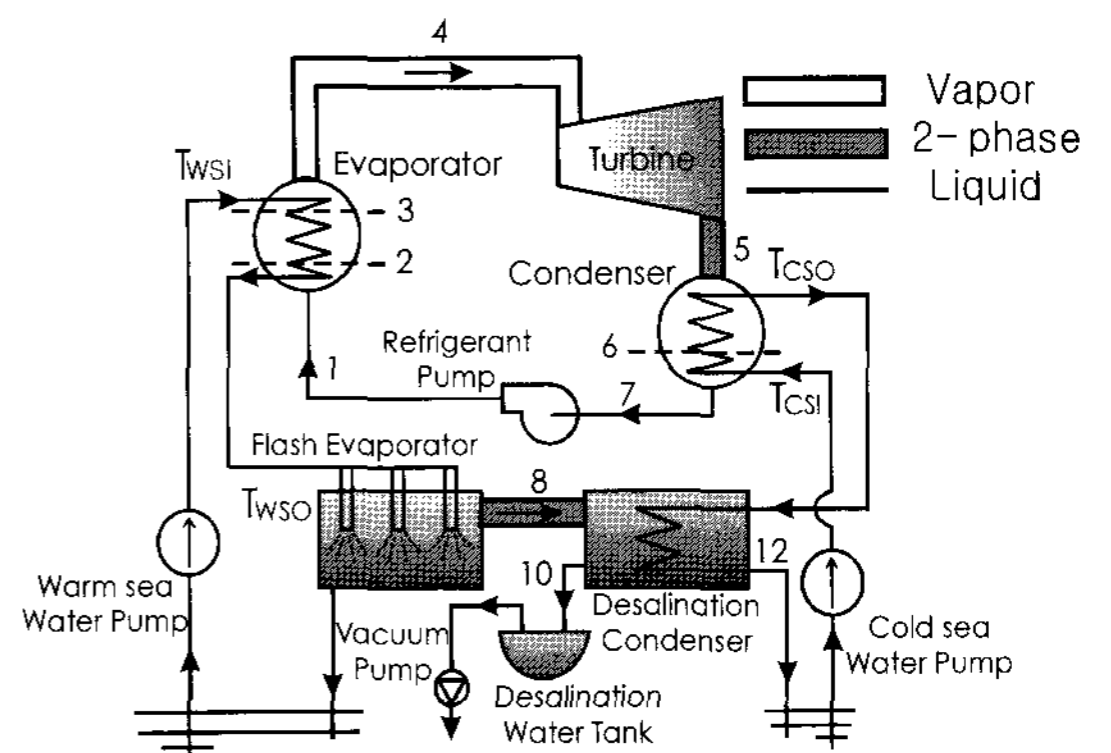


그림 5. 혼합형 사이클 개요도

3. 사이클 해석 방법

여러 종류의 작동유체와 사이클간의 성능을 비교하기 위해서는 증발용량이 일정하다고 가정하는 것이 이상적이다. 따라서 본 연구에서는 증발기의 용량을 150kW로 일정하다고 가정하였으며, 이는 증발기에서 물의 질량유량과 증발기로 들어가고

나오는 물의 온도를 고정시킴으로써 가능하다. 또한, 증발기의 UA, 증발기와 응축기에서 해수측 질량유량, 터빈과 작동유체 펌프의 효율, 표층수의 입·출구 온도, 심층수의 입구온도를 표 1과 같은 조건하에서 모사하였다.

표 1. 사이클 계산 조건

Warm sea water inlet temperature (°C)	28
Warm sea water outlet temperature (°C)	25
Cold sea water inlet temperature (°C)	4
LMTD in evaporator (°C)	2.5
LMTD in condenser (°C)	2.5
Isentropic turbine efficiency (%)	100
Isentropic pump efficiency (%)	100
Heat transfer rate in evaporator (kW)	150

작동유체가 변함에 따라 터빈으로부터 생성되는 일의 양이 변하므로 시스템의 효율 또한 변하게 된다. 그리고 다양한 작동유체에 대하여 터빈일이 변하므로 응축기를 통하여 차가운 해수로 전달되는 열량도 작동유체에 의해 좌우된다. 또한 응축기로 들어오는 해수의 질량유량과 온도는 일정한 값을 갖는 것으로 가정하였으므로 에너지 평형에 의해 응축기에서 나오는 해수의 온도는 작동유체에 따라 변하게 된다. 그리고 작동유체마다 증발 잠열이 다르므로 동일한 증발용량을 내는 경우에도 질량유량이 다르게 마련이다. 따라서 이 같은 점을 고려하기 위해서 터빈과 펌프의 체적유량은 변하는 것으로 간주하였으며, 모든 사이클 해석에 있어서 터빈과 펌프의 경우 등엔트로피 효율을 100%로 동일하게 적용하였다.

증발기와 응축기에서 적절하게 열전달 방정식을 적용하는 것은 전체 시스템의 성능을 정확히 계산하는데 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 증발기와 응축기의 열전달 효율은 대수평균온도차로 정의하였다. 각각의 조건에 상관없이 증발용량이 일정하다고 가정하였으므로 증발기의 총괄열전달

계수와 전열면적의 곱(UA) 또한 상수로 줄 수 있다. 열전달 해석을 위해 증발기는 과냉영역, 2상영역, 과열영역의 세 부분으로 나누었으며, 응축기는 과냉영역과 2상영역의 두 부분으로 나누었다. 따라서 UA 값과 LMTD 값을 준 경우에 작동유체와 해수사이의 열교환은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.⁵⁾

$$\begin{aligned}
 UA_e &= UA_{sube} + UA_{tpe} + UA_{supe} \\
 \frac{1}{LMTD_e} &= \frac{F_{sube}}{LMTD_{sube}} \\
 &+ \frac{(1 - F_{sube} - F_{supe})}{LMTD_{tpe}} + \frac{F_{supe}}{LMTD_{supe}} \\
 UA_c &= UA_{subc} + UA_{tpc} \\
 \frac{1}{LMTD_c} &= \frac{F_{subc}}{LMTD_{subc}} + \frac{(1 - F_{tpc})}{LMTD_{tpc}}
 \end{aligned}$$

여기서 A는 열교환기 면적, F는 열교환기 전체 열량에 대한 과냉, 2상, 과열부분의 열량비를 나타낸다.

또한, 해수측의 펌핑동력을 제외한 사이클의 총 출력(터빈출력-작동유체 펌핑동력)을 증발용량으로 나눈 값을 각 사이클의 효율로 간주하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 작동유체 선정

그림 6은 표 1의 표준조건을 기준으로 단순 렌킨사이클에서 계산한 9개의 작동유체에 대한 사이클 효율을 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 본 연구에서 고려한 작동유체들의 열효율 차이는 매우 작았다. 이 중 R125와 R717이 가장 높은 효율을 보였지만, R717은 냄새 및 독성 때문에 R125가 작동유체로 가장 적합한 것을 알 수 있다. 또한, 그림 7은 R22를 기준으로 한 각 작동유체의 상대적 터빈의 크기를 보여준다. 터빈의

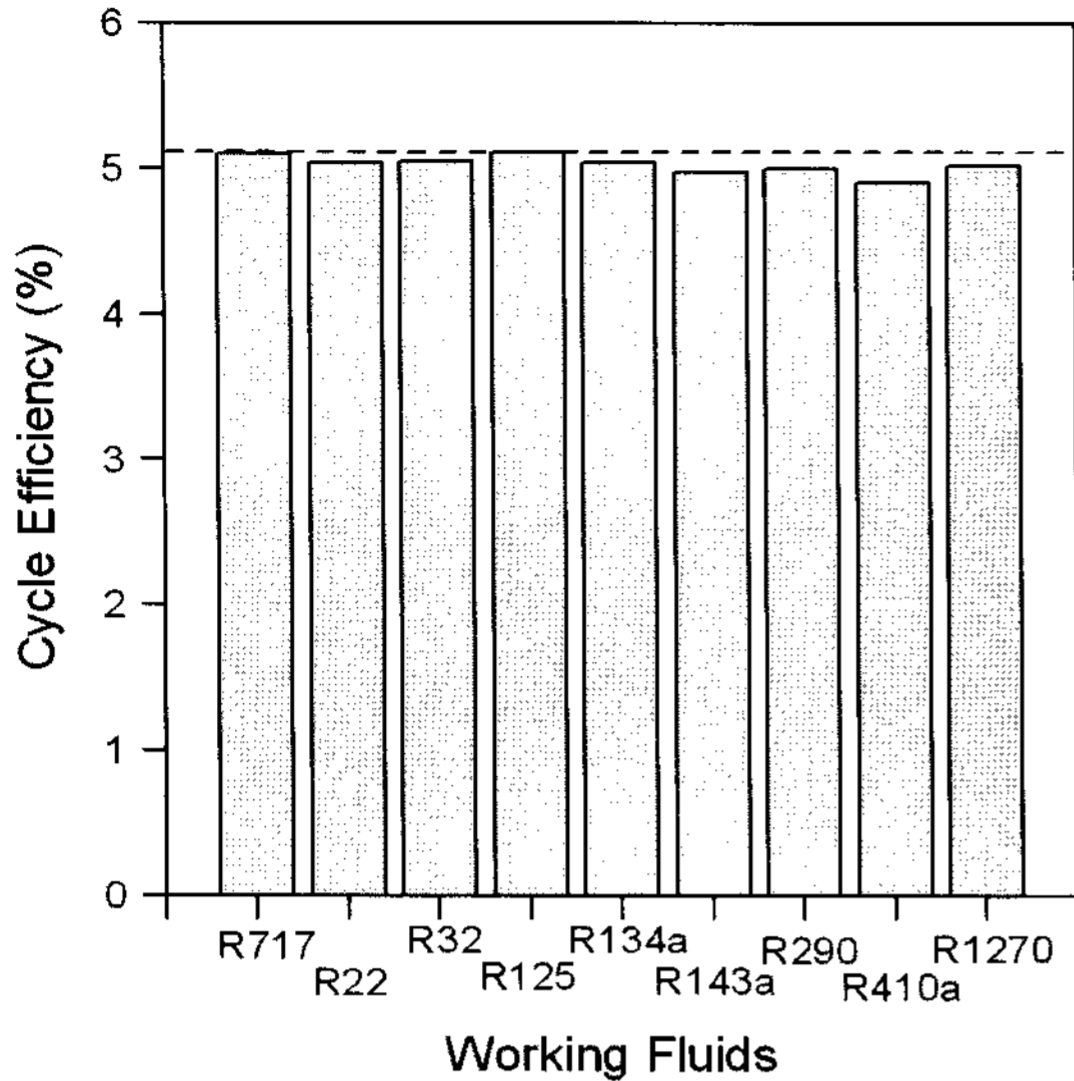


그림 6. 작동유체에 따른 단순 랭킨사이클 효율비교

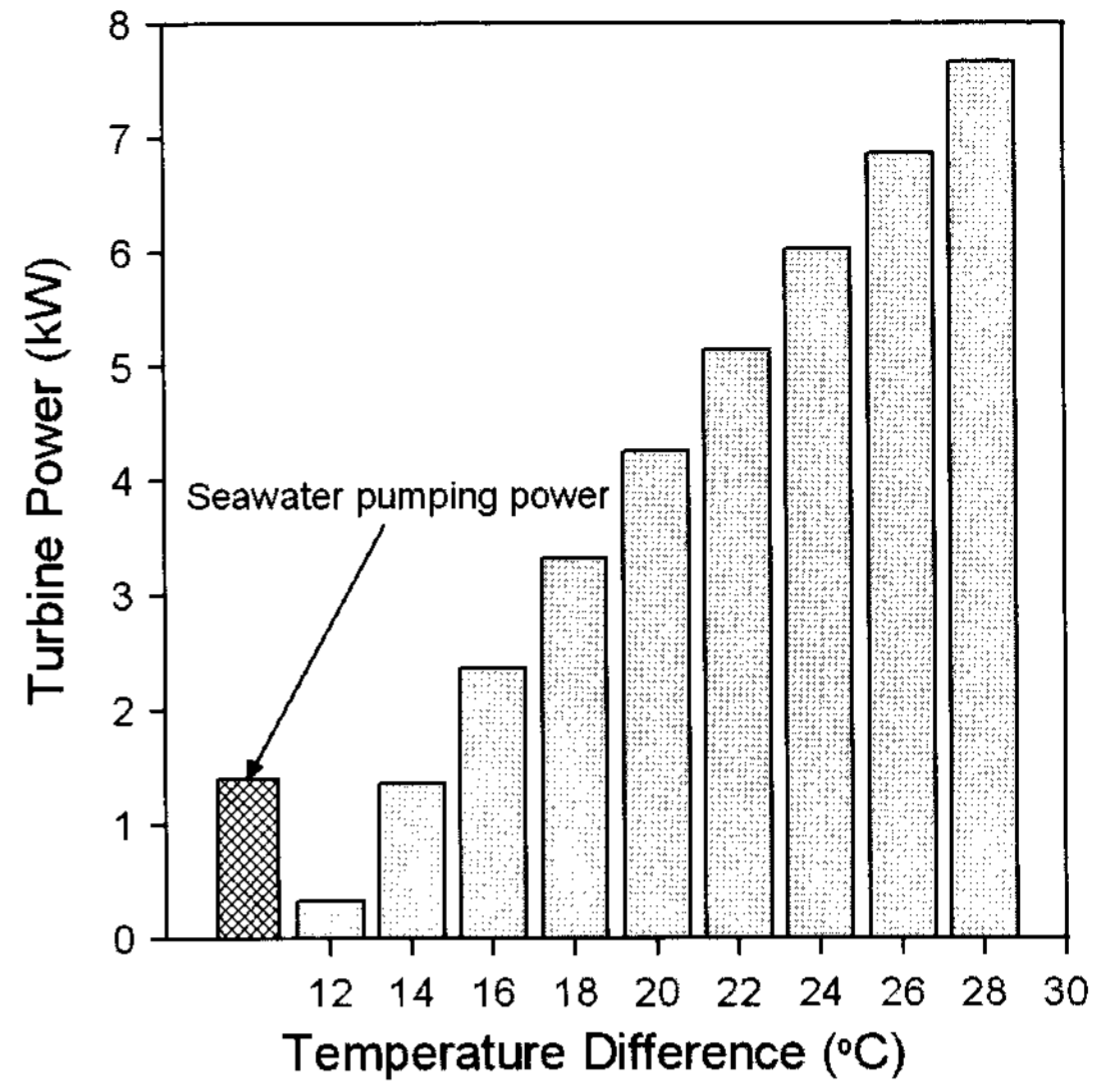


그림 8. 온도차에 따른 터빈출력비교

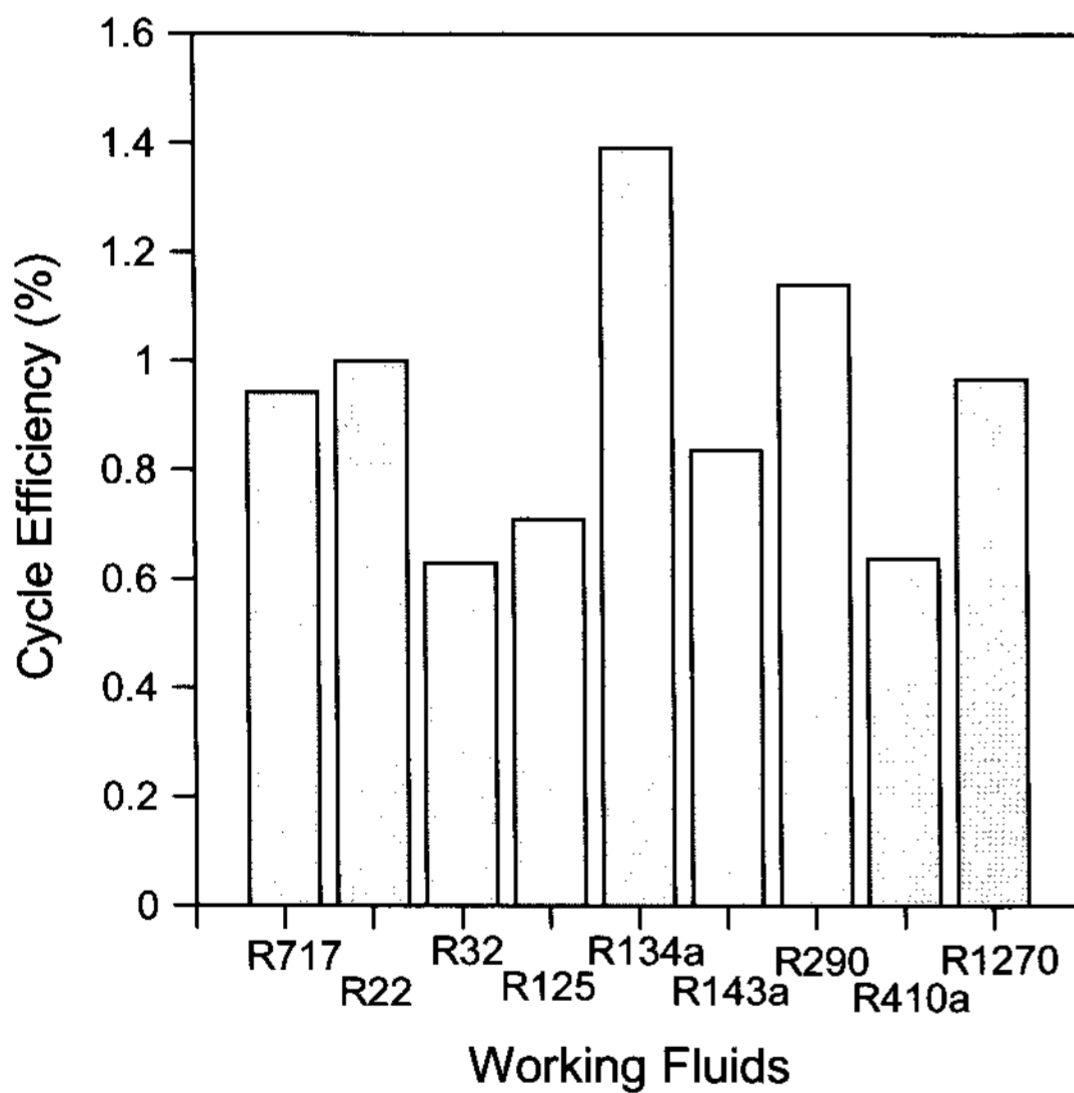


그림 7. 작동유체에 따른 터빈크기 비교 (R22기준)

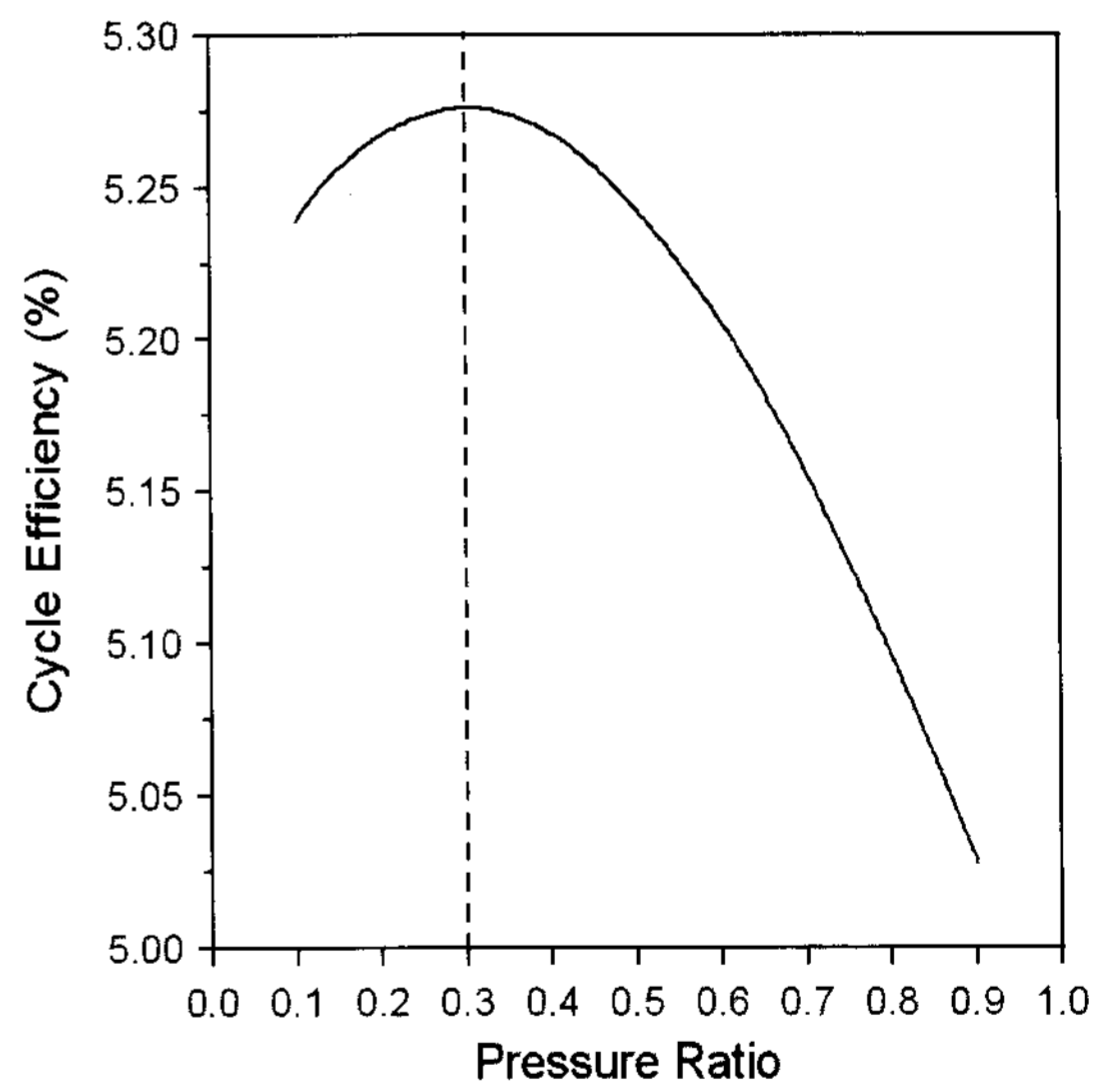


그림 9. 압력비에 따른 재생식 랭킨 사이클 효율

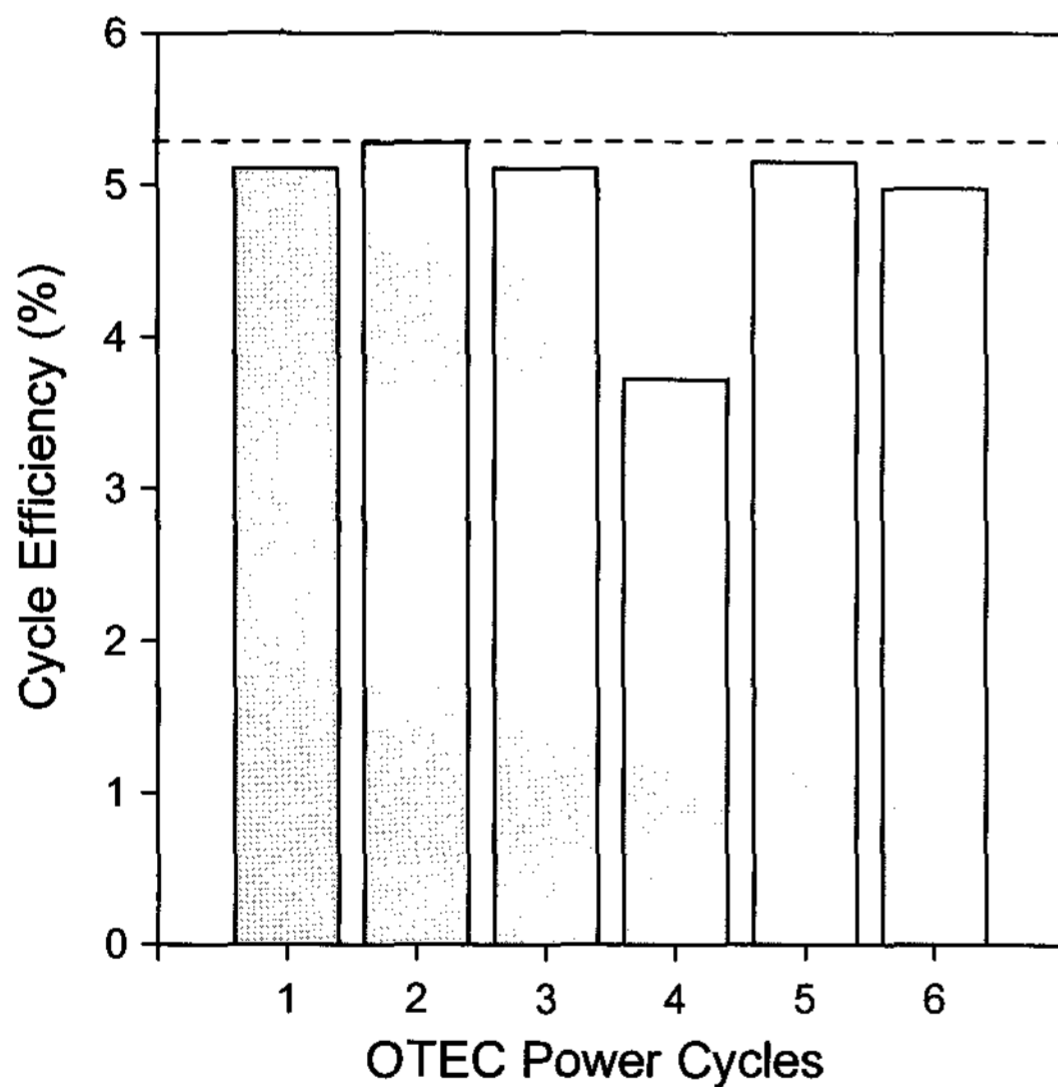
크기는 터빈 입·출구의 엔탈피 차를 터빈입구의 비체적으로 나눈 값으로 정의할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 R32, R125, R410a를 사용하면 많은 연구자들이 제안한 R22와 R717을 사용하는 경우 보다 터빈크기가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 그림 6과 그림 7의 결과로부터 ODP 0,

GWP 0.11인 R32와 ODP 0, GWP 0.84인 R125를 사용하면 효율을 높이고, 초기 투자비용도 줄일 수 있다. 그림 8은 표 1의 기준으로 작동유체를 효율이 가장 좋은 R125로 하여 심층수의 온도를 4°C 고정시키고 표층수의 온도의 변화에 따른 총 출력의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에

서 볼 수 있듯이 해수를 펌핑하는데 소요되는 펌프의 총 동력이 15°C이하 일 때 사이클의 출력보다 높기 때문에 출력이 0보다 작아지게 된다. 따라서 단순 랭킨 사이클로부터 전기를 생산하기 위해서는 표층수의 온도와 심층수의 온도가 15°C이상이어야 한다는 것을 알 수 있다.

4.2 사이클 간 효율비교

재생식 랭킨 사이클의 모사 조건은 표 1과 동일하지만, 단순 랭킨 사이클과는 달리 필요한 변수는 냉매를 추가하는 부분의 압력이다. 표층수와 심층수의 온도에 따라 고온과 저압이 정해지고, 중간압력은 그렇지 않으므로 중간압력을 선정해야 한다. 중간압력은 다음과 같이 구할 수 있다.



- 1. 단순 랭킨 사이클 2. 재생식 랭킨 사이클 3. 혼합형 사이클
- 4. 개방형 사이클 5. 칼리나 사이클(NH₃/H₂O)
- 6. 칼리나 사이클(R32/R134a)

그림 10. 여러 OTEC 사이클 효율비교

$$P_{mid} = P_{low} + f_p(P_{high} - P_{low})$$

여기서 f_p 는 압력비이다. f_p 의 값이 0인 경우 중간압은 P_{low} 이고, f_p 의 값이 1인 경우와 같게 된

다. 따라서 f_p 의 값을 0.1부터 0.9까지 변화시켜 가며 작업을 수행하였다. 그림 9는 f_p 의 변화에 따른 재생식 랭킨 사이클의 효율을 나타낸 것이고, f_p 가 0.3일 때 최고의 효율을 보여준다. 따라서 재생 사이클의 경우 f_p 를 0.3으로 놓고 효율을 계산하였다.

그림 10은 작동유체를 R125로 하여 여러 가지 사이클의 효율을 비교한 그림이다. 그림에서와 같이 재생식 랭킨 사이클의 효율이 가장 좋은 것을 알 수 있고, 개방형 사이클은 담수 자체를 사용하기 때문에 기화시 담수에 녹아 있던 가스가 나오기 때문에 그 가스를 제거하기 위한 추가 동력이 필요하므로 사이클의 효율이 낮게 나왔다.

4.3 온배수를 이용한 사이클 효율

그림 11은 월성 원자력 발전소 주변 해역의 2005년 평균 온도를 나타낸 그림이다. 원자력 온배수의 정확한 데이터 측정의 불가능으로 인하여, 일반적으로 많이 알려진 해수와 온배수의 온도차 7°C를 해수의 온도에 더하여 원자력 온배수를 모사하였다. 그림 12와 그림 13은 그림 11의 원자

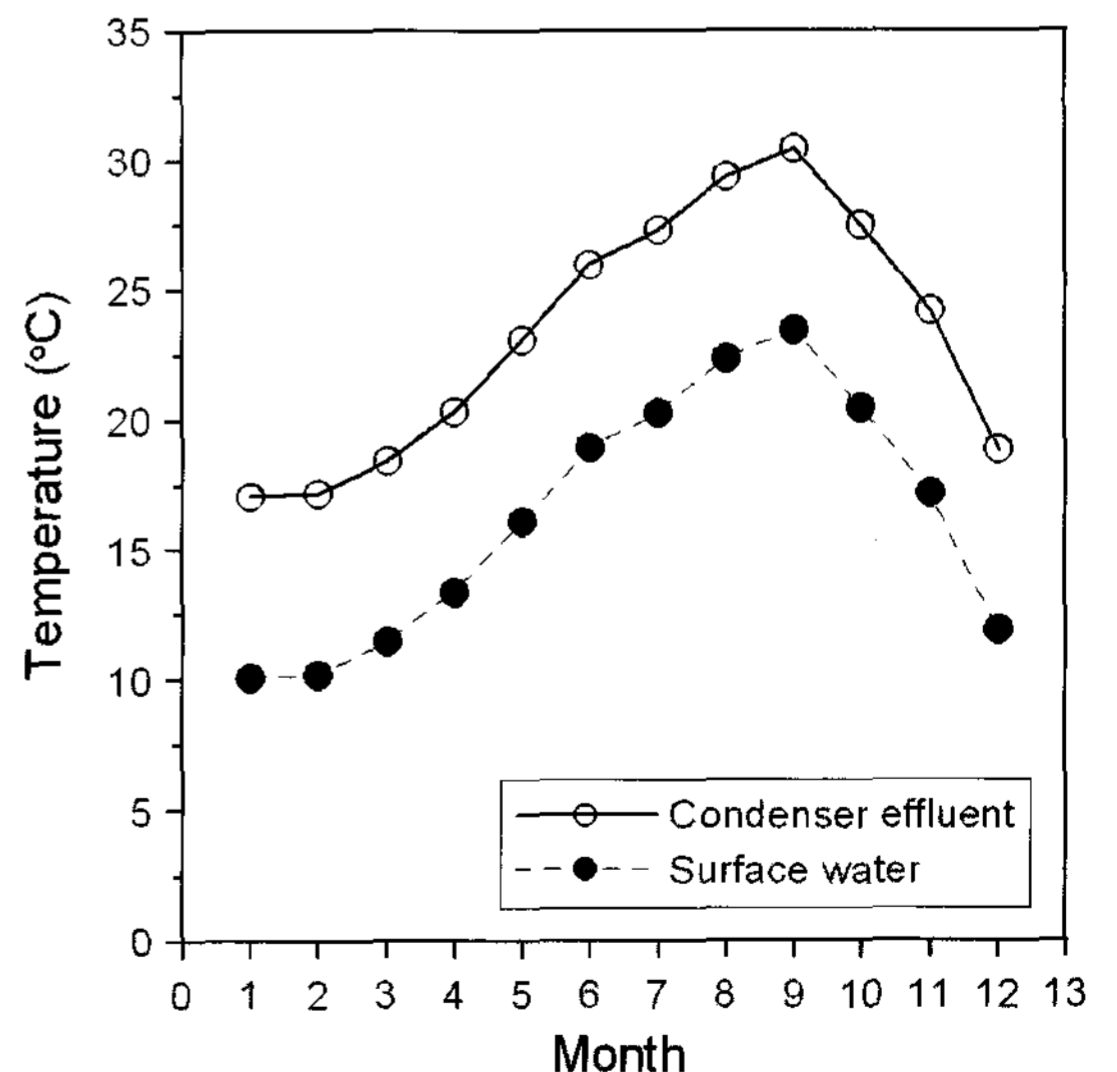


그림 11. 월성 원자력발전소 온배수온도

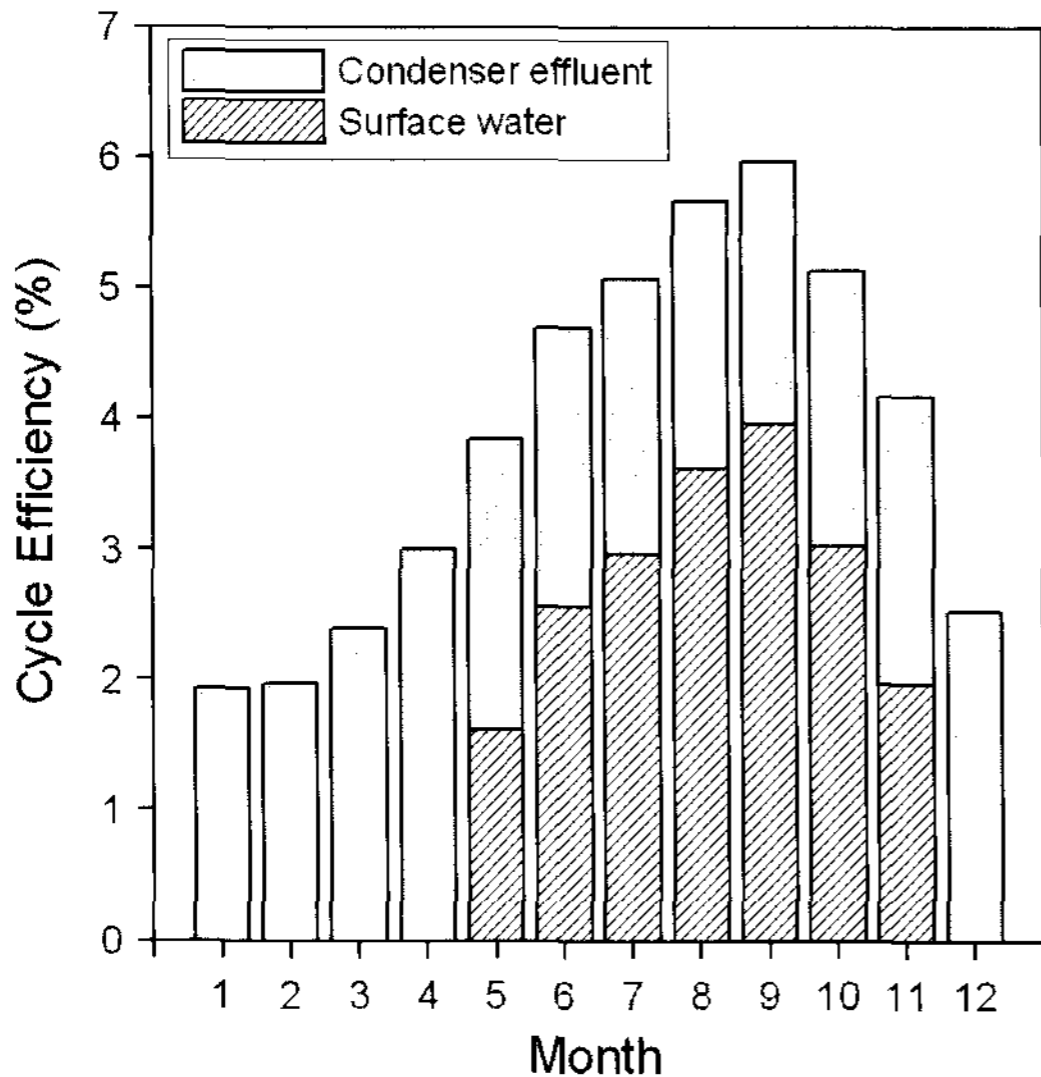


그림 12. 월별 재생식 랭킨 사이클 효율

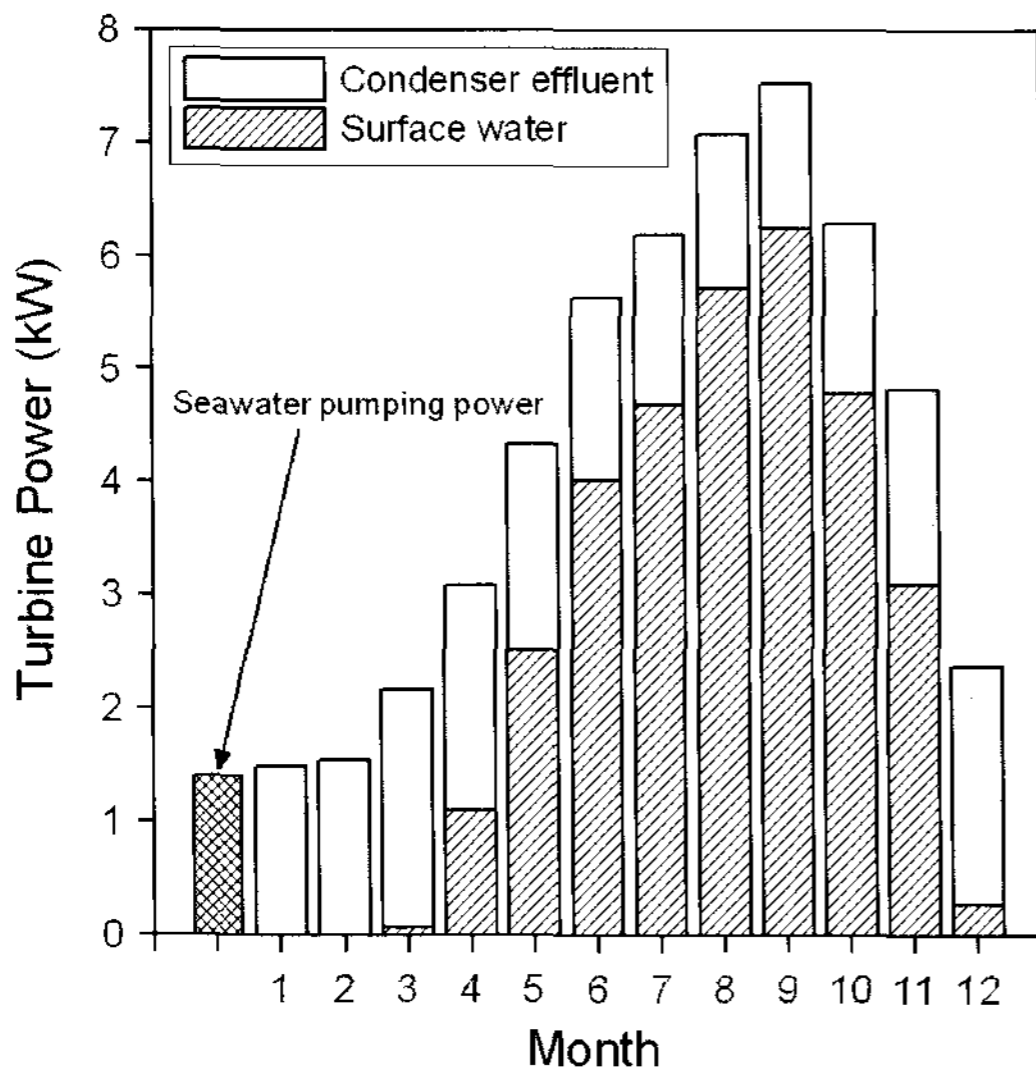


그림 13. 월별 터빈 출력비교

력 발전소 온배수의 온도를 표층수의 온도로 하고 작동유체를 R125로 하였을 때의 재생식 랭킨 사이클의 효율과 출력을 나타낸 그림이다. 원자력 온배수를 표층수 대신 사용하면 효율이 2% 이상 증가하였다. 그러나 겨울철에는 효율이 2% 미만이라 우리나라 동해안 지역에 OTEC 발전 시스템을 설치하기 위해서는 보다 많은 선행연구가 필요

함을 알 수 있다.

5. 결론

- (1) OTEC 발전 시스템의 작동유체로는 R32, R125를 고려할 수 있음을 알았다.
- (2) 표층수와 심층수의 온도차가 최소 15°C 이상 일 때 전기를 생산할 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 같은 조건에서 여러 가지 사이클의 효율을 비교 하였을 때, 재생식 랭킨 사이클의 효율이 가장 높게 나타났다.
- (4) 원자력 온배수를 이용하였을 경우 겨울철에는 2%미만의 효율을 나타냈지만, 표층수를 사용할 경우보다 효율이 2% 이상 향상됨을 알았다.

후 기

이 논문은 2007학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Luis A. Vega, Ocean Thermal Energy Conversion, John Wiley & Sons, 1995.
2. Uehara, H, and Ikegami, Y., Optimization of a Closed-Cycle OTEC system J. of solar energy Engineering, 112, pp.247~256, 1990,
3. Vadus, J., A strategy for OTEC Commercialization, Processing of the 1997 International OTEC/DOWA Association, pp.235~247, 1997.
4. Uehara H., and Ikegami Y., Parametric performance analysis of OTEC using Kalina cycle", Joint solar engineering conference, ASME, pp.203~207, 1993.

5. Shin, S.H., Jung, D.S., Kim, C.B., Seo, T.B., Analysis of a simple Rankine Cycle and Regenerative Rankine Cycle for

OTEC Application, Proceedings of the Int. OTEC/DOWA Conference, pp.142~151, 1999