

울진 원자력발전소 온배수를 이용한 재생식 해양온도차발전에 대한 연구

강 윤 영, 박 성 식, 박 윤 범*, 김 남 진†

제주대학교 에너지공학과, * 제주국제대학교 차세대교통차량공학과

A Study on Regenerative OTEC System using the Condenser Effluent of Uljin Nuclear Power Plant

Yun-Young Kang, Sung-Seek Park*, Nam-Jin Kim†

Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

*Department of Transportation and Automotive Engineering, Jeju International University, Jeju 690-714, Korea

(Received April 13, 2012; revision received June 26, 2012)

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 study, we examined the thermodynamic performance of the OTEC power system for the production of electric power. Computer simulation programs were developed under the same condition and various working fluids for closed Rankine cycle, regenerative cycle, Kalina cycle, open cycle, and hybrid cycle. The results show that the regenerative cycle showed the best system efficiency. And then we examined the thermodynamic performance of regenerative cycle OTEC power system using the condenser effluent from Uljin nuclear power plant instead of the surface water. The highest system efficiency of the condition was 4.55% and the highest net power was 181 MW.

Key words: 해양온도차발전(OTEC), 온배수(Condenser effluent), 재생식 사이클(Regenerative cycle), 원자력발전소(Nuclear power plant), 효율(Efficiency)

1. 서 론

현재 인류는 지구온난화 문제와 에너지 부족 문제에 직면해 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 친환경적이며 재생가능한 대체 에너지가 필요하다. 해양 온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)은 태양으로부터 지구의 바다로 흡수되는 에너지를 이용할 수 있는 발전 시스템이다. 이 개념은

1881년 프랑스의 d'Arsonval에 의해 처음으로 제안되었다.⁽¹⁾ 이 후 1970년대 오일파동으로 인한 에너지 원 문제가 급부상함에 따라 OTEC 시스템은 미국과 일본을 중심으로 세계 각국에서 꾸준히 연구되고 있다. 그 결과 1979년 최초의 OTEC 시스템이 하와이에서 탄생하였고, 18 kW의 순수출력을 낼 수 있었다. 일본의 사가대학에서는 R22와 암모니아를 작동 유체로 사용하는 75 kW 출력의 OTEC 시스템을 갖추고 연구 중이다. 하지만 OTEC 시스템의 막대한 초기투자비용과 신뢰성 있는 데이터의 부족으로 인하여 OTEC 시스템의 상업화가 이루어지지 못하고 있다.^(2, 3) 또한 우리나라의 경우 포항 근처의 동해안

† Corresponding author

Tel.: +82-64-754-3643; fax: +82-64-757-9276

E-mail address: jnkim@jejunu.ac.kr

에서는 표층수와 해저 약 200 m인 심층수의 온도차가 20℃인 것으로 밝혀져 OTEC 시스템의 적용이 가능한 것으로 보고되었다.⁽⁴⁾ 그러나 이 온도차가 겨울에는 약 10℃ 정도로 낮아진다. 이 때 펌프가 소모하는 동력이 시스템의 총 출력보다 커지게 되어 전력 생산을 기대할 수 없으나 원자력발전소로부터 배출되는 온배수를 OTEC 시스템에 이용하면 표층수를 이용할 때보다 시스템 효율을 약 2% 증가시킬 수 있다고 보고되었다.^(5, 6) 또한, 원자력발전소 온배수에 의한 해양오염을 방지할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 OTEC 시스템의 실효성을 높이고, 발전효율을 극대화시키기 위하여 실제 울진 원자력발전소로부터 배출되는 온배수량과, 월별 온배수 데이터를 이용하여 OTEC 시스템에 적용할 수 있는 각 사이클 및 작동유체의 시스템 효율과 출력에 대하여 비교분석 하였다.

2. OTEC 시스템 사이클

2.1 단순 랭킨 사이클

Fig. 1은 단순 랭킨 사이클을 이용한 OTEC 발전 시스템의 개략도이다. 해양온도차발전은 열을 표층수로부터 얻기 때문에, 일반적인 랭킨 사이클의 보일러 대신 증발기(Evaporator) 내부를 거치며 표층수와 작동유체간의 열교환이 이루어지고, 포화(혹은 과포화, 과열)기체가 된 작동유체는 터빈으로 이동하여 발전기(Generator)를 작동시킨다. 온도가 떨어진 작동유체는 이상(2-phase) 상태에 놓이게 되고 응축기(Condenser)에서 심층수와 열교환을 하고 과냉 상태가 된다. 이후 과냉 상태의 유체는 펌프를 통해 증발기로 유입되어 사이클을 완성하게 된다. 단순 랭킨 사이클에 쓰일 수 있는 냉매는 암모니아와 HCFC, CFC 같은 불화탄소류가 있으나, 암모니아는 독성과 가연성, 그리고 심한 냄새가 단점이고, 불화탄소류는 오존분해물질이라는 단점이 있다. 따라서 세계 각국은 이를 대체할 수 있는 냉매들을 개발 중에 있다.

2.2 개방형 사이클

Fig. 2는 개방형 사이클의 개략도이다. 개방형 사이클은 단순 랭킨 사이클과는 다르게 작동유체가 해수이다. 증발기 내부가 매우 낮은 압력으로 유지되

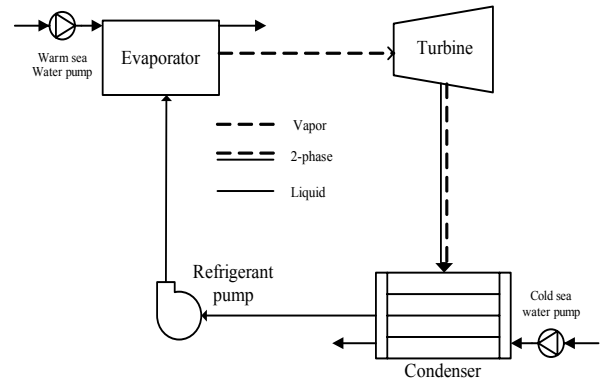


Fig. 1 Schematic diagram of a closed system.

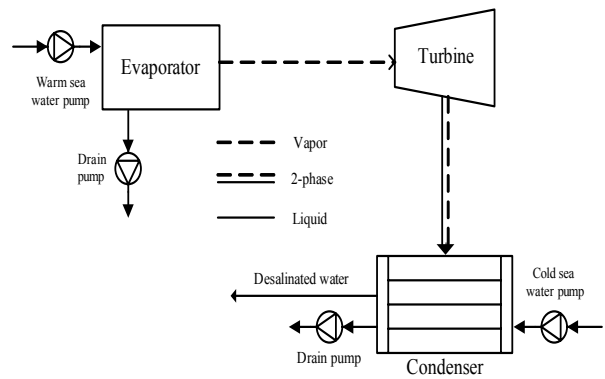


Fig. 2 Schematic diagram of an open system.

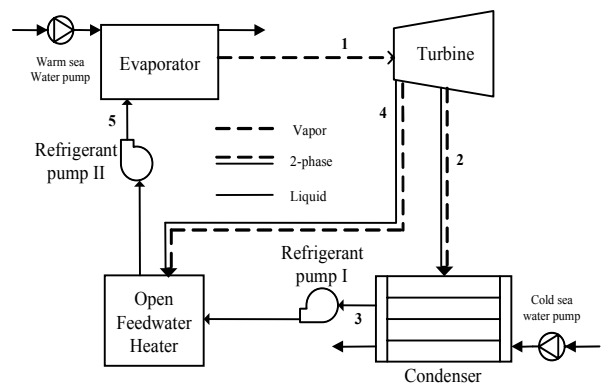


Fig. 3 Schematic diagram of a regenerative system.

기 때문에, 증발기로 들어간 해수는 바로 증발하여 터빈을 작동시키고, 이상 상태로 응축기로 이동하게 된다. 여기서 일부의 물은 담수저장탱크로 이동하고 나머지 물은 배출된다. 개방형 사이클은 해수를 작동유체로 이용하기 때문에 해수에 녹아들어 있던 수소, 산소 등이 증발기의 저압으로 인하여 불응축 가스 상태로 변하게 된다. 이런 불응축가스는 시스템 전반에 악영향을 미칠 수 있으므로 제거해야 하

며, 불응축가스를 제거하는 데에 필요한 동력은 전체 출력의 약 10% 정도인 것으로 보고되었다.⁽⁷⁾

2.3 재생식 사이클

Fig. 3은 재생식 사이클의 개략도이다. 기존의 단순 랭킨 사이클과 많이 유사하나, Open feed water heater가 추가되어 터빈으로부터 일부 증기가 추출된 뒤 Open feed water heater로 이동되어 증발기로 들어가는 작동유체를 미리 가열시킨다. 단순 랭킨 사이클의 구조를 기본으로 하여 Open feed water heater와 펌프가 각각 하나씩 추가된 형태이다.

2.4 칼리나 사이클

Fig. 4는 칼리나 사이클의 개략도이다. 칼리나 사이클은 단순 랭킨 사이클에 분류기(Separator), 재생기(Regenerator), 팽창밸브(Expansion valve), 혼합기(Mixer)가 추가된 형태의 시스템이다. 기본적으로 작동유체는 물, 암모니아 혼합물이며 이 혼합물은 증발기에서 해수와의 열교환으로 인해 증발하게 된다. 다음으로 이 증기혼합물은 분류기에서 포화증기, 포화액으로 분리되고, 분리된 포화증기는 터빈을 작동시키고 혼합기로 유입되게 된다. 포화액은 재생기로 들어가 증발기로 유입되는 물, 암모니아 혼합물과 열교환을 한 후에 혼합기로 들어가게 되며, 터빈으로부터 온 유체와 섞이게 된다. 이 혼합물은 응축기를 거치며 차가운 해수와 열교환을 하게 되고 포화액 상태로 변환 후 재생기를 통과하여 증발기로 다시 돌아오게 된다.

2.5 혼합형 사이클

Fig. 5는 혼합형 사이클의 개략도이다. 혼합형 사이클은 개방형 사이클과 단순 랭킨 사이클의 결합 형태이다. 개방형 사이클과 똑같이 담수를 생산할 수 있으며, 동시에 단순 랭킨 사이클에 근접한 효율을 가진다. 혼합형 사이클은 Integrated 혼합형 사이클과 Joint 혼합형 사이클로 구분할 수 있다. 두 사이클의 차이점은 기화기(Flash Evaporator)의 위치이며, Uehara et al.은 1996년에 두 가지 사이클 중 효율이 더 높은 것은 Integrated 혼합형 사이클이라고 보고하였다.⁽⁸⁾ Fig. 5와 같이 Integrated 혼합형 사이클은 단순 랭킨 사이클과 개방형 사이클을 연

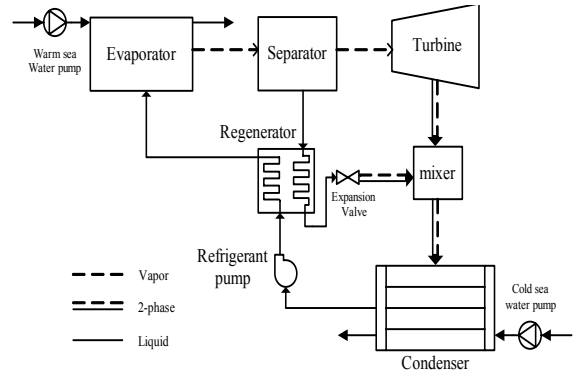


Fig. 4 Schematic diagram of a Kalina system.

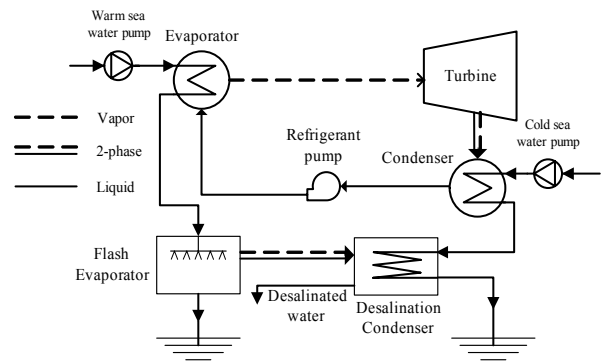


Fig. 5 Schematic diagram of a hybrid system.

결해놓은 듯한 모습이다. 작동유체가 증발기에서 표층수와 열교환 과정을 거친 후 기화기로 들어가 증발된 후 응축기를 통과한 심층수와 열교환을 하면서 액체 상태로 변하고, 담수 저장 탱크로 향하게 되는 것이 특징이다. 혼합형 사이클도 개방형 사이클과 마찬가지로 불응축가스를 제거하는 데에 동력이 소모되며, 이 동력은 전체출력의 약 2.8% 정도로 알려져 있다.⁽⁹⁾

3. 사이클 해석방법

여러 종류의 작동유체와 사이클에 따른 계산 결과를 합리적으로 비교하기 위해 증발기용량, 증발기의 총괄열전달계수와 전열면적의 곱인 UA, 원전 온배수 유량, 응축기에서의 해수 측 질량유량, 터빈과 작동유체 펌프의 효율, 심층수의 입구온도와 같은 조건들을 Table 1에 나타내었다. 여기서 칼리나 사이클의 경우 작동유체인 암모니아/물의 수용액은 2상열전달 과정에서 비열의 변화가 발생하기 때문에 온도프로파일이 2차유체측과 선형적으로 매칭되지 않아 2.5 °C의 LMTD는 낮은 값일 수 있다.

Table 1 Cycle operating conditions

기본 조건	증발기로 들어오는 표층수 온도(°C)	28
	증발기에서 나가는 표층수 온도(°C)	25
	응축기로 들어오는 심층수 온도(°C)	4
	증발기의 LMTD(°C)	2.5
	응축기의 LMTD(°C)	2.5
	등엔트로피 터빈효율(%)	100
	등엔트로피 펌프효율(%)	100
	증발기의 열전달율(kW)	150
	표층수의 질량유량(kg/s)	11.96
	심층수의 질량유량(kg/s)	11.72
재생식	과열도(°C)	2.0
	과냉도(°C)	2.0
칼리나	재생식 압력비	0.3
	재생기의 유효도	0.95
개방형	증발기의 유효도	0.85
	증발기 압력(kPa)	2.5
	표층수의 질량유량(kg/s)	6.16
	심층수의 질량유량(kg/s)	5.98
	증발기로 들어오는 온배수 온도(°C)	28.12
울진 원전 기본 조건	증발기에서 나가는 온배수 온도(°C)	25.12
	응축기로 들어오는 심층수 온도(°C)	1
	증발기의 LMTD(°C)	2.5
	응축기의 LMTD(°C)	2.5
	등엔트로피 터빈효율(%)	85
	등엔트로피 펌프효율(%)	85
	증발기의 열전달율(MW)	3990
	온배수의 질량유량(ton/s)	318.2
	심층수의 질량유량(ton/s)	301.6

각 사이클의 작동유체가 변함에 따라 터빈에서 생성되는 출력과 동시에 시스템의 효율도 바뀌게 되고, 응축기를 통하여 심층수로 전달되는 열의 양도 변하게 된다. 그리고 응축기로 유입되는 심층수의 질량유량과 온도는 일정한 값을 가진다고 가정하기 때문에 에너지 평형에 의하여 응축기에서 나가는 심층수의 온도는 결국 작동유체에 따라 변하게 된다. 또한 작동유체마다 증발잠열이 다르므로 동일한 증발용량을 가지는 경우에도 질량유량이 다르게 된다. 이러한 점을 고려하기 위하여 터빈과 펌프의 체적유량은 변한다고 간주하였고, 모든 사이클 해석에서 터빈과 펌프의 등엔트로피 효율을 100%로 동일하게 적용하였으며, 실제 OTEC에서는 터빈 출구의 액적 상태에 따라 터빈 블레이드 손상이 발생하므로 이를 막기 위하여 터빈 출구 이상 조건의 건

도한계가 있다.

증발기와 응축기에서 적절하게 열전달 방정식을 적용하는 것 또한 전체 시스템의 성능을 정확하게 계산하는 데 있어서 아주 중요한 요소이다. 따라서 증발기와 응축기의 열전달 효율은 대수온도차(Log Mean Temperature Difference, LMTD)로 정의하였고 해석의 단순성을 위하여 압력강하는 무시하였다. 각각의 조건에 상관없이 증발기용량이 일정하다고 가정하였으므로 증발기의 UA는 상수가 되며, 열전달 해석을 위해 증발기는 과냉 영역, 2상 영역, 과열 영역의 세 부분으로 구분하였다. 응축기는 과냉 영역과 2상 영역의 두 부분으로 나누어 고려하였다. 따라서 유체와 냉각수, 심층수 간의 열교환은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$UA_e = UA_{subes} + UA_{tpe} + UA_{supc} \quad (1)$$

$$\frac{1}{LMTD_c} = \frac{f_{subc}}{LMTD_{subc}} + \frac{(1-f_{subc}-f_{supc})}{LMTD_{tpe}} + \frac{f_{supc}}{LMTD_{supc}} \quad (2)$$

$$UA_e = UA_{subc} + UA_{tpe} \quad (3)$$

$$\frac{1}{LMTD_c} = \frac{f_{subc}}{LMTD_{subc}} + \frac{(1-f_{tpe})}{LMTD_{tpe}} \quad (4)$$

여기서, f는 열교환기 전체의 열량에 대한 과냉, 2상, 과열부분의 열량비를 나타낸다.

본 연구에서는 Table 1의 조건 하에서 모든 사이클의 효율을 비교하여 가장 효율이 뛰어난 사이클을 확인한 뒤, 2010년의 실제 울진 원자력발전소 온배수 데이터를 이용하여 해수온도차 발전의 효율 및 출력을 계산하였다.

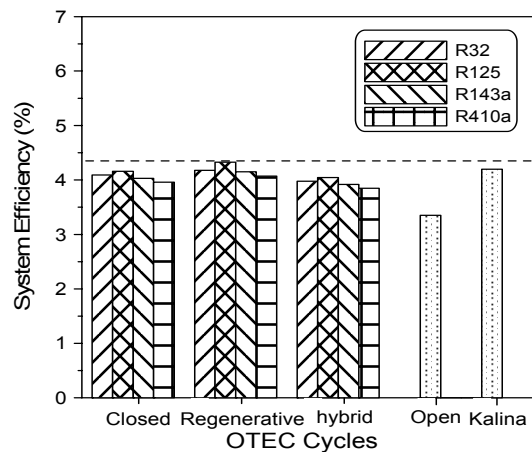


Fig. 6 Comparison of the efficiencies of each cycle.

4. 결과

4.1 최적 사이클 선정

Fig. 6은 Table 1의 기본조건을 이용하여 OTEC 시스템에 적용할 수 있는 각 사이클의 시스템 효율을 비교한 그림이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 시스템 효율이 가장 높은 사이클은 재생식 사이클이며, 시스템 효율이 가장 낮은 사이클은 개방형 사이클이다. 재생식 사이클은 작동유체가 증발기로 유입되기 전에 Open feed water heater에서 작동유체를 미리 가열하기 때문에 효율이 높고, 개방형 사이클은 불응축가스 제거에 추가적인 동력이 소모되므로 효율이 낮다.

4.2 작동유체 선정

Fig. 7은 Table 1의 실제 울진 원전의 온배수 데이터 조건하에 Fig. 6에서 가장 높은 효율을 보인 재생식 사이클의 각 작동유체 간 시스템 효율을 비교하여 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 R134a 냉매를 사용하였을 때 가장 좋은 시스템 효율을 얻을 수 있으며, 이 때의 효율은 4.55%임을 확인하였다. 또한 R410a 냉매의 시스템 효율은 4.1%로 가장 낮다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 가장 좋은 시스템 효율을 얻을 수 있는 R134a를 냉매로 사용한 재생식 사이클의 T-s 선도를 나타내고 있다. 응축기 출구의 R134a 냉매(상태

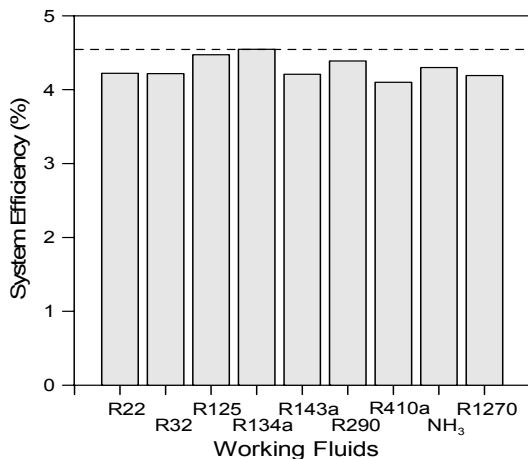


Fig. 7 Comparison of regenerative system efficiencies as the various working fluids.

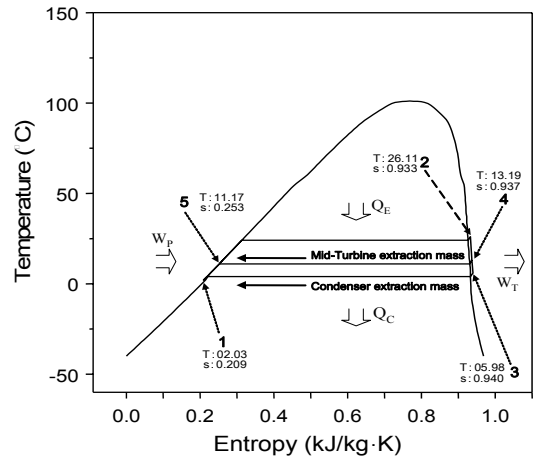


Fig. 8 T-s diagram of regenerative cycle using refrigerant-134a.

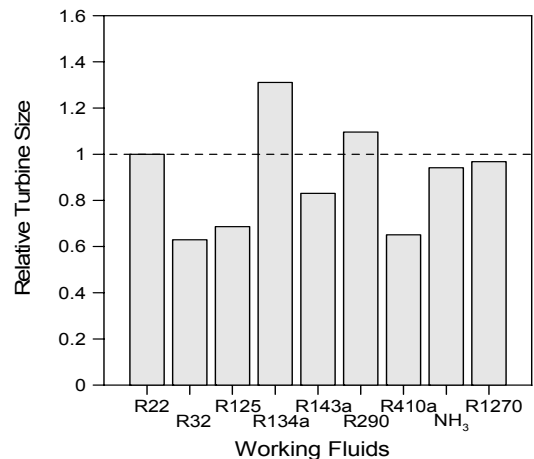


Fig. 9 Comparison of relative turbine size as the various working fluids.

1)는 증발기를 거쳐 터빈 입구(상태 2)로 향한다. 터빈에서 발전기를 작동시키는 도중 일부 냉매가 추출되고(상태 4) 나머지는 응축기 입구(상태 3)로 이동한다. 응축기 출구의 냉매는 Refrigerant pump-I을 지나 Open feed water heater에서 상태 4의 냉매와 혼합된 후(상태 5) 다시 증발기로 향한다.

Fig. 9는 R22를 기준으로 한 각 작동유체간의 상대적 터빈 크기를 비교한 것이다. 터빈의 크기는 터빈 입구와 출구의 엔탈피 차를 터빈으로 유입되는 작동유체의 비체적으로 나눈 값으로 정의된다. R22의 터빈 크기를 1.0이라고 하였을 때, R32, R410a, R125, R143a순으로 0.63, 0.65, 0.69, 0.83의 상대적 크기를 보였다. 또한 R125 냉매를 작동유체로 사용하면 터빈초기 투자비용 대비 시스템 효율이 가장 높다는 것을 알 수 있었다.

4.3 과냉도, 과열도와 압력비가 시스템 효율에 미치는 영향

Fig. 10은 과냉도와 과열도가 시스템 효율에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위한 그래프이다. 실제 울진 원자력발전소의 2010년 9월 온배수 데이터를 이용하여 R22 냉매를 작동유체로 사용하는 재생식 사이클의 과냉도와 과열도 조건을 정량적으로 변화시켜 시스템 효율의 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 과열도는 효율에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있다. 과냉도는 증가할수록 효율이 감소하였으나 그 정도가 매우 작기 때문에 시스템 효율에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

재생식 사이클은 단순 랭킨 사이클과 달리 3개

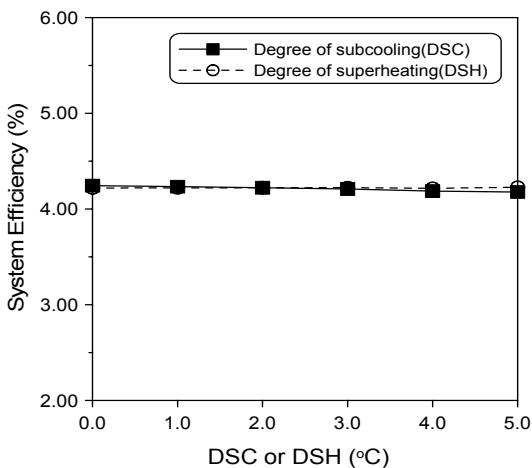


Fig. 10 Effects of superheating and subcooling on the regenerative system efficiency.

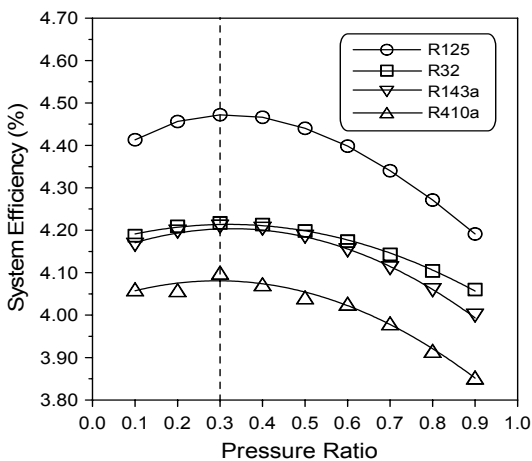


Fig. 11 Efficiency of the regenerative system as a function of the pressure ratio.

의 압력이 존재한다. 고압과 저압은 각각 표층수와 심층수의 온도에 따라서 정해진다. 재생식 사이클의 시스템 효율은 중간압이 다르게 설정됨 따라 달라진다. 압력비는 저압과 고압 사이의 중간압의 비를 뜻한다. 압력비가 0일 시, 중간압은저압과 같아지며, 압력비가 1일 시, 중간압은 고압과 같은 압력을 나타내게 된다. 따라서 Fig. 11에 실제 울진 원자력발전소의 온배수 데이터를 이용하여 재생식 사이클의 압력비에 따른 시스템 효율변화를 계산하여 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 0.3까지의 압력비에서는 압력비가 증가함에 따라 시스템 효율도 같이 증가함을 확인할 수 있으며, 0.3 이후의 압력비에서는 오히려 시스템 효율이 감소함을 알 수 있다. 따라서 0.3의 압력비에서 가장 우수한 시스템

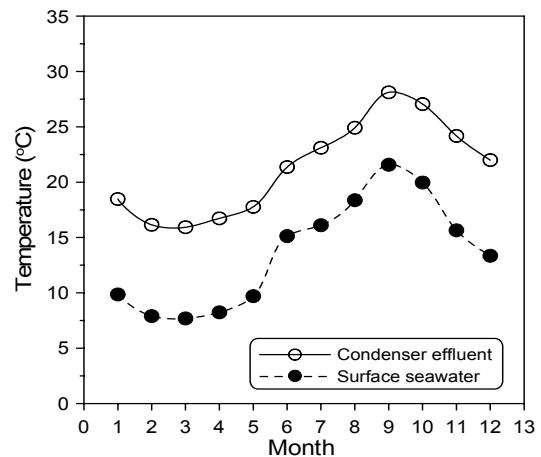


Fig. 12 Monthly temperature of effluent and seawater around the Uljin nuclear power plant.

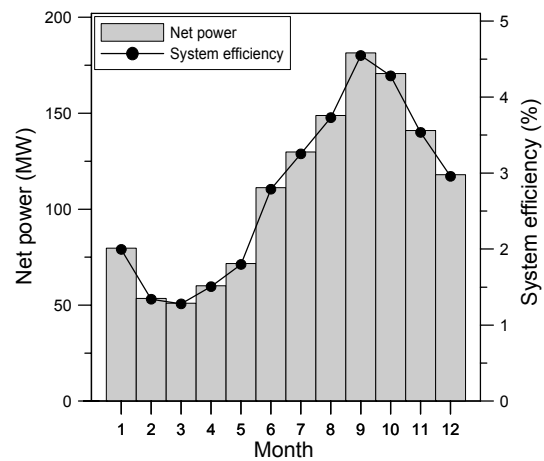


Fig. 13 Monthly system efficiency and turbine net power.

효율을 나타냄을 확인하였다.

4.4 온배수를 이용한 재생식 사이클의 성능

Fig. 12는 울진원전의 월별 취수구와 배수구의 해수 온도를 나타낸 그래프이다. 표층수와 온배수 모두 9월에 가장 높고 3월에 가장 낮은 온도를 보이고 있다. Fig. 13은 Fig. 7에서 가장 우수한 효율을 보인 R134a 냉매와 실제 울진 원자력발전소의 월별 온배수 온도 데이터를 이용하여 계산한 재생식 사이클의 시스템 효율과 출력을 각각 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 시스템 효율과 출력이 가장 높을 때는 9월임을 알 수 있으며 이때의 시스템 효율은 4.55%이고, 출력은 181 MW 임을 확인하였다. 반면 시스템 효율과 출력이 가장 낮을 때는 3월이며 1.28%의 시스템 효율과 51 MW의 출력을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 울진 원자력발전소 온배수를 이용한 재생식 해양온도차발전에 대한 전산해석을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 또한 (2), (3), (4)의 계산결과는 증발기 및 응축기의 LMTD가 2.5°C인 조건 하에 수행되었다.

(1) 각 사이클별 효율을 비교한 결과 가장 우수한 효율을 가진 사이클은 재생식 사이클임을 알 수 있었다.

(2) 과열도와 과냉도는 효율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 압력비는 0.3일 때 가장 효율이 뛰어난 것으로 나타났다.

(3) 효율이 가장 뛰어난 작동유체는 R134a로 최대 4.55%의 시스템 효율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

(4) 울진의 원자력 온배수를 이용할 경우 최대 181 MW에 해당하는 발전량을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0021616, No.R332011000101660).

참고문헌

1. D'Arsonval, A., 1881, Utilisation de forces naturelles, *Revue Scientifique*, Vol. 17, pp. 370-372.
2. Uehara, H. and Ikegami, Y., 1990, Optimization of a Closed-Cycle OTEC system, *J. of solar energy Engineering*, Vol. 112, pp. 247-256.
3. Vadus, J., 1997, A Strategy for OTEC Commercialization, *Processing of the 1997 International OTEC/DOWA Association*, pp. 235-247.
4. Korea Power Company, 1991, A Study on the Development of Ocean Thermal Energy Conversion and Wave Power Generation System, Technical report, KRC-89G-T10.
5. Kim, N. J., Kim, C. N., Chun, and W. G., 2009, Using the condenser effluent from a nuclear power plant for Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC), *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1008-1013.
6. Kim, N. J., Shin, S. H., and Chun, W. G., 2006, A Study on the Thermodynamic Cycle of OTEC system, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 26, No. 2, pp. 9-18.
7. Penny, T., Bharathan, D., Althof, J., and Parsons, B., 1984, Open-Cycle Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) Research : Progress Summary and a Design Study, ASME Paper, 84-WA/Sol-26.
8. Uehara, H., Miyara, A., Ikegami, and Y., Nakaoka, T., 1996, Performance analysis of an OTEC plant and a desalination plant using an integrated hybrid cycle, *J. of Solar Energy Eng.*, Vol. 118, pp. 115-122.
9. Panchal, C. B. and Bell K. J., 1987, Simultaneous production of desalinated Water and power using a hybrid-cycle OTEC plant, *Transaction of the ASME*, Vol. 109, pp. 156-160.
10. Shin, S. H., Jung, D. S., Kim, C. B., and Seo, T. B., 1999, Analysis of a simple Rankine Cycle and Regenerative Rankine Cycle for OTEC Application, *Proceedings of the International OTEC/DOWA Conference*, pp. 142-151.