

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol.17. No.4, 1997

폐쇄형 해양온도차발전 사이클에 관한 연구

신상호*, 정동수**, 김종보**, 서태범**, 천원기***, 오정무****

* 인하대학교 대학원

** 인하대학교 기계공학과

*** 제주대학교 에너지공학과

**** 과학기술정책관리연구소

A Study of Closed OTEC Power Plants

Sang ho Shin*, **Dong soo Jung****, **Chong-Bo Kim****,
Tae beom Seo**, **Won gee Chun*****, **P. Chung moo Auh******

**, ** Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon, 402-751*

**** Dept. of Energy Engineering, Cheju National University, Cheju, 690-751*

***** Science & Technology Policy Institute, Seoul, 100-430.*

요 약

본 연구에서는 Rankine 사이클을 이용한 해양 온도차 발전 시스템을 컴퓨터로 모사했고 작동유체를 변화시켜 가면서 그 성능을 비교하였다. 증발기와 응축기는 UA(총괄열전달계수×전열면적)와 LMTD(대수평균온도차) 방법으로 모사하였으며 터빈과 펌프는 등엔트로피 효율로 모사하였다. 작동유체로는 R22, R290, R1270, R134a, R125, R143a, R32, R410A 그리고 암모니아 등을 사용하였다. 모사 결과 OTEC 발전 시스템의 효율은 작동유체에 상관없이 거의 일정한 것으로 드러났다. 한편 증발기 출구에서의 과열도와 응축기 출구에서의 과냉도는 시스템의 성능에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 터빈의 효율과 열교환기의 크기는 시스템 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 마지막으로 따뜻한 표층수와 차가운 심해수 사이의 온도차가 20℃ 이상일 때 실제로 전기를 생산할 수 있다는 사실을 확인했다.

Abstract

In this paper, performance of various working fluids is evaluated for the closed Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) power plant operating on Rankine cycle. The evaporator and condenser are modeled via UA and LMTD method while turbine and pump are modeled by specifying isentropic efficiencies. R22, Propane, Propylene, R134a, R125, R143a, R32, R410A and Ammonia are used as working fluids. Results show that newly developed fluids such as R410A and R32 that do not cause stratospheric ozone layer depletion perform as well as R22 and ammonia. The superheat at the evaporator exit and subcooling at the condenser exit do not affect the performance of the simple OTEC power cycle. Turbine efficiency and heat exchanger size influence greatly the performance of the Rankine cycle. Finally, it was shown that closed OTEC power plants can practically generate electricity when the difference in warm and cold sea water inlet temperatures is greater than 20°C.

1. 서론

바다는 대략 지구 표면의 75%를 차지하고 있으며 거의 고갈되지 않는 무한대의 청정에너지를 가지고 있다. 지구에 도달하는 태양에너지는 해수 표면에서 급속히 흡수가 되어 바람과 파도에 의해 해수 표면의 온도는 일정하게 유지된다. 해수 표면으로부터 30~100m 이하가 되면 수심이 깊어질수록 해수의 온도가 감소하여 약 800~1000m 깊이에서는 해수의 온도가 약 4°C 정도 된다. 그러나 1년 내내 한류가 유입되는 지역에서는 수심이 대략 200~300m인 곳에서도 4°C의 물을 얻을 수 있다.

현재 인류는 심각한 에너지, 환경 문제에 직면하고 있으며 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)이라 한다. OTEC 과정의 핵심은 증기 발전 시스템을 가동시키기 위해 표층수와 심층수의 온도차를 이용한다는 것이다. 그리고 이러한 온도차가 20°C 이상일 때 OTEC 시스템이 동력을 생산할 수

있다는 사실은 잘 알려져 있다. 1994년에 Avery와 Wu는 OTEC 시스템이 생산할 수 있는 동력이 해수가 흡수하는 평균 태양에너지의 약 0.07%에 불과한 약 0.19MW/km² 정도임을 보여주었다.⁽¹⁾ 1996년 Takahashi와 Trenka는 OTEC 발전 시스템이 특히 섬지방과 화석 연료 제품을 수입하는 많은 연안 국가들의 경우에 엄청난 잠재력을 가지고 있음을 강조했다.⁽²⁾ 또한 전기를 생산하는 것 외에도 OTEC 발전 시스템의 응축기로부터 나오는 심층수는 담수 생산, 양식, 공기조화, 냉동 그리고 기타 여러 가지 적용사례 등에 사용될 수 있다.

Avery와 Wu가 자신들의 저서에서 현재의 OTEC 기술에 대한 상세한 정보를 기술한데 반해⁽¹⁾ Takahashi와 Trenka는 OTEC에 대한 전반적인 소개를 하고 있다.⁽²⁾ 1996년 Tanner는 미래의 OTEC 계획뿐만 아니라 현재 적용시킬 수 있는 전세계의 OTEC 기술들을 요약하였다.⁽³⁾

OTEC의 개념은 1881년 프랑스의 공학자인 d'Arsonal가 처음으로 제안하였다.⁽⁴⁾ 그 후 1930년에 Claude는 Cuba의 Matanzas만에서 플랜트를 설계하여 실지 실험을 수행하였다.⁽⁵⁾ 이 실험장치는 22kW의 동력을 생산하였으며, 이것은 장

치를 구동시키기 위해 소모되는 동력보다 더 적은 양이었다. 그러나 1970년대의 오일 파동으로 인해 많은 국가들이 대체 에너지를 찾기 시작했고, 이에 따라 OTEC의 잠재력에 대한 연구가 다시 시작되었다. 그 결과 1979년 하와이에서 소형의 폐쇄형 OTEC 사이클이 처음으로 18kW의 순수출력을 낼 수 있었다. 1980년 하와이 천연 에너지 연구소(NEHL)는 1MW급 OTEC용 열교환기에 대한 실험을 하와이에서 성공리에 수행하였다. 한편 1993년에는 NEHL에서 OTEC 플랜트의 성능시험을 수행한 결과, 213kW의 전기를 생산하였고 시스템 구동에 필요한 전기를 제외하면 순수 출력은 60kW였다. 이처럼 순수출력이 낮은 이유는 양식에 쓰기 위해 발전에 필요한 유량보다 더 많은 양의 심층수를 퍼 올리기 위해 펌프일이 부가적으로 많이 늘어났기 때문이다. 이 실험은 더 큰 크기의 개방형 OTEC 사이클에 대해 현재 터빈 크기가 제약을 받고 있음을 보여 주었다.

일본의 경우에는 구주의 사가대학이 자신들의 실험실에 R22와 암모니아를 작동유체로 사용하는 75kW 출력의 OTEC 시스템을 갖추고 지난 20년간 연구를 진행하고 있다. Uehara와 그의 동료들은 OTEC용 열교환기와 새로운 사이클 개발 등 많은 연구를 수행⁽⁶⁾하고 있지만 현재 일본에서 괄목할 만한 연구 결과는 보고되고 있지 않다.

1997년에 Vadus는 대만이 지난 10년간 매우 활발한 OTEC 연구를 수행하여 많은 발전을 이루었다고 발표했다.⁽⁷⁾ 그들은 해변에 설치되어 여러 가지 부산물을 내게 될 5MW급 OTEC 사이클에 대한 상세 설계를 마쳤으며 현재 계획중인 해양 공원에 지열발전 설비와 더불어 OTEC 발전 시설을 설치하려 하고 있다. 스리랑카는 남동쪽 해안선을 따라 OTEC 발전소를 건립하는

것에 대한 가능성을 고려하고 있으며 인도 또한 자신들의 해안선에 설치할 1MW급 OTEC 발전소의 설계를 이미 끝마쳤다.

한편 Vadus는 시스템 설치에 소비되는 막대한 비용과 신뢰성 있는 시스템의 데이터의 부족으로 인해 OTEC 발전 시스템의 상업화가 방해받고 있다고 주장했다.⁽⁷⁾ 지난 20여년 동안의 열교환기에 대한 획기적 개발과 연안에 설치할 수 있는 시스템의 개발뿐만 아니라 청정 에너지에 대한 관심의 증가에도 불구하고 OTEC 발전 시스템의 실용화는 아직도 더 시간이 흘러서야 비로소 가능할 것으로 보인다.

한국의 경우에는 1970년대 이후 산업화가 급속도로 진행됨에 따라 에너지의 소비는 엄청나게 증가하고 있지만 천연 자원은 극히 한정되어 있기 때문에 국내에서 소비되는 에너지의 약 80%를 수입에 의존할 수밖에 없는 실정이고, 현재는 에너지 생산의 대부분을 화력 발전과 원자력 발전에 의존하고 있다. 그러나 화석 연료나 원자력 발전에 쓰이는 우라늄의 양 역시 전세계적으로 한정되어 있으므로 한국은 대체 에너지에 대한 많은 연구를 개시하였다. 1989년부터 1991년까지의 3년동안 한국전력공사에서는 한반도에 적절한 OTEC 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 비록 한국이 열대 지방에 위치해 있지는 않지만 포항근처의 동해안에서는 겨울을 제외하고는 거의 일년 내내 표층수와 수심이 약 200m인 곳의 해수의 온도차가 20°C인 것을 밝혀냈다.⁽⁸⁾ 한국에서는 지난 20여년간 많은 원자력 발전소가 건설되었으나 발전소 응축기에서 방출되는 물이 발전소 주변의 해수 온도를 증가시켜 많은 어패류가 죽어가고 있고, 이로 인한 현지 주민들의 불만이 큰 상태이다. 최근에 한국 과학기술처는 원자력 발전소 응축기에서 방출된 물과 차가운 해수를 이용한 OTEC 시스템

연구를 수행할 것이라고 밝혔다. 이같은 개념으로 일년 내내 가동이 가능한 육상 설치 폐쇄형 발전소를 건설한다면 환경 및 에너지 문제는 동시에 해결할 수 있을 것으로 전망된다.

본 연구에서는 OTEC 시스템 설계를 위해 Rankine 사이클을 이용하여 작동유체에 따른 폐쇄형 OTEC 사이클의 성능과 시스템 성능을 좌우하는 변수의 영향을 살펴보았다.

2. 사이클 해석

2.1 폐쇄형 OTEC 발전 사이클

Fig. 1과 Fig. 2는 Rankine 사이클을 이용한 OTEC 발전 시스템의 개략도와 T-s선도이며, Fig. 2에는 각 지점에서 물과 작동유체의 온도를 열 흐름과 함께 도시하였다. 4번 상태에서 과냉 액체가 증발기에 들어가며 유체가 따뜻한 표층수와 열교환을 통하여 증발이 일어나 과열증기상태로 증발기를 나오게 된다(6번 상태). 이 증기는 터빈을 가동시킨 후 2상 상태가 되어 응축기로 유입된다. 그리고 응축기에서 심층수와 작동유체가 열교환을 하여 작동유체의 대부분이 과냉된 상태에서 응축기로부터 나오게 되며 마지막으로 이 액체는 사이클을 완성하기 위해 펌프에 의해 압력이 상승하여 증발기로 다시 들어가게 된다.

여러가지 작동유체의 성능을 비교하기 위해서는 모든 유체에 대하여 증발용량 Q_E 이 일정하다고 가정하는 것이 이상적이다. 이것은 증발기에서의 물의 질량유량(m_{wsw})과 증발기로 들어가고 나오는 물의 온도(T_{wswi} , T_{wswo})의 값을 고정시킴으로써 가능하다. 작동유체가 변함에 따라 터빈으로부터 생성되는 일(W_T)의 양이 변하므로 시스템의 효율 또한 변하게 된다. 다양한 작동유체에 대하여 W_T 가 변하므로 응축기를 통하여

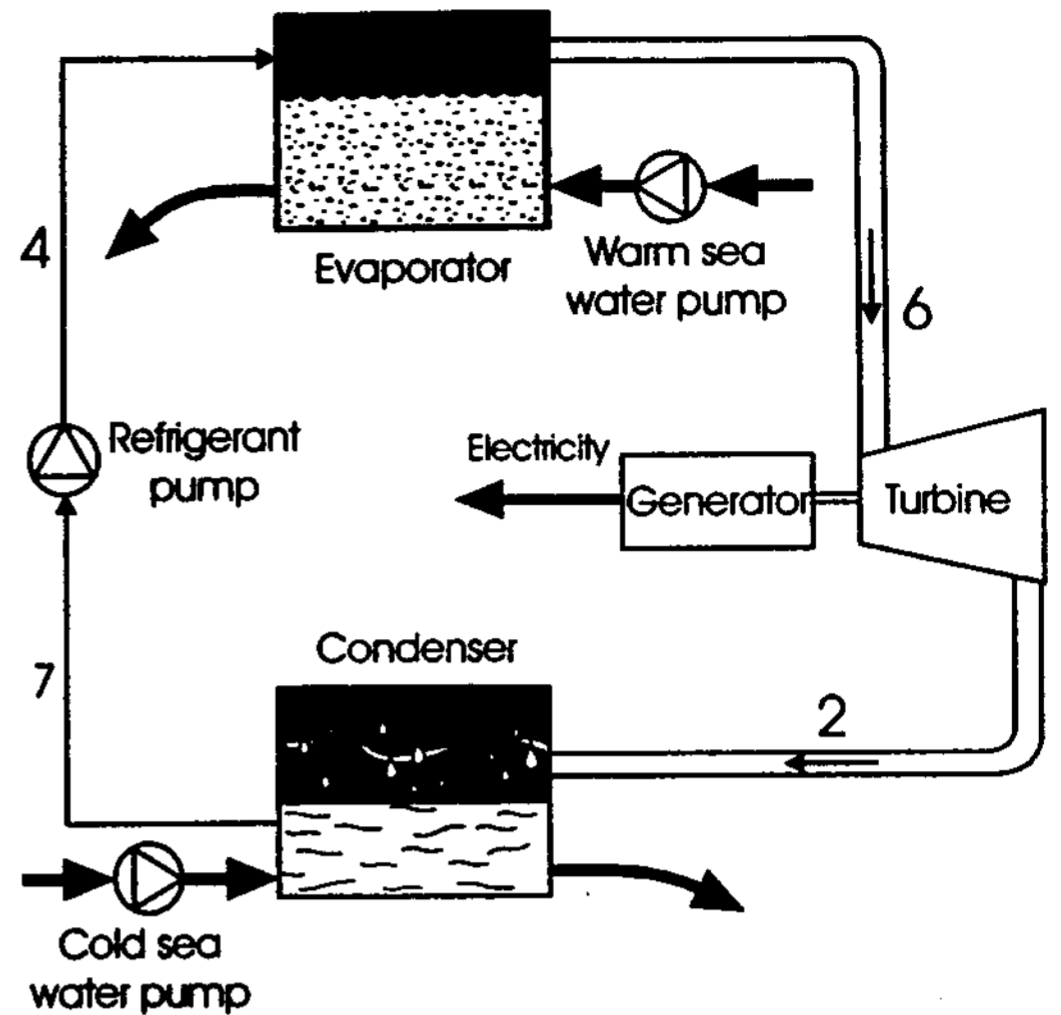


Fig. 1. Schematic diagram of a closed OTEC power plant

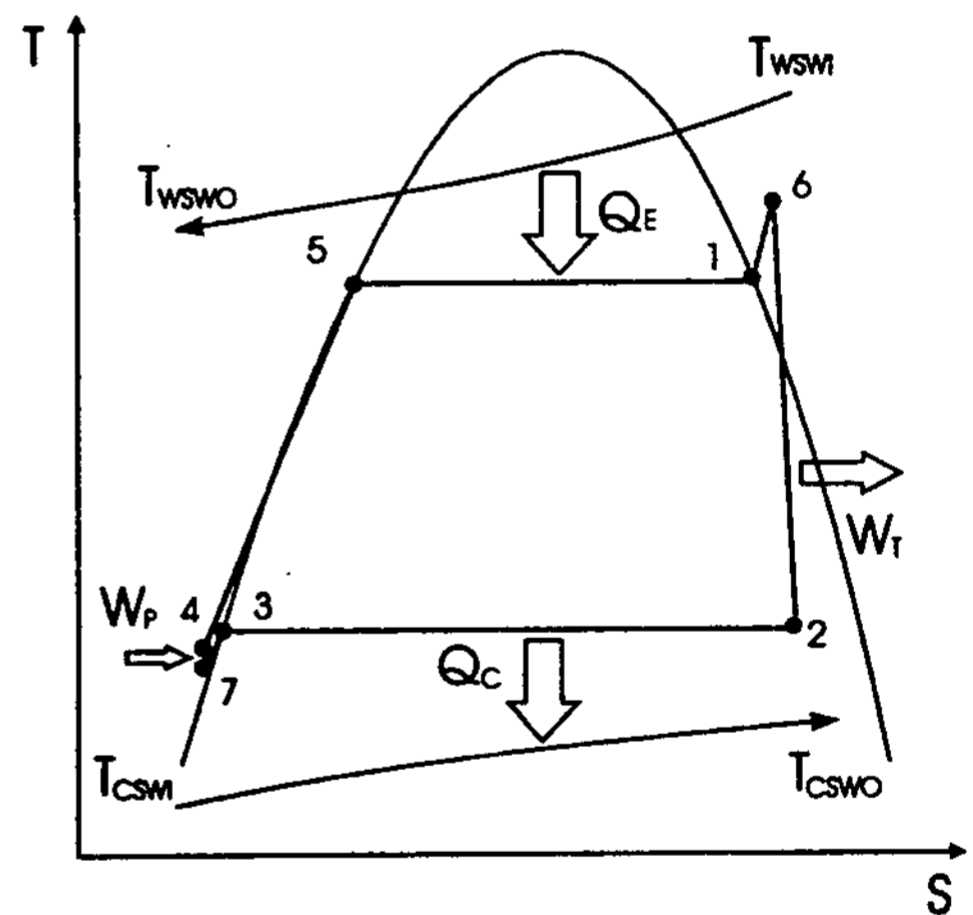


Fig. 2. T-s diagram of a closed OTEC cycle operating on a Rankine cycle

차가운 해수로 전달되는 열량(Q_C) 또한 작동유체에 의해 좌우된다. 또한 응축기로 들어오는 해수의 질량유량(m_{csw})과 온도(T_{cswi})는 일정한 값을 갖는 것으로 가정했으므로 에너지 평형에 의해 응축기에서 나오는 해수의 온도(T_{cswo})는 작동유체에 따라 변하게 된다.

작동유체마다 증발잠열이 다르므로 동일한 증발용량을 내는 경우에도 질량유량이 다르게 마련

이다. 따라서 이같은 점을 고려하기 위해서 터빈과 펌프의 체적유량은 변하는 것으로 간주하였으며, 터빈과 펌프의 비이상적 특성을 고려하기 위해 각각 등엔트로피 효율을 적용하였다.

2.2 열교환기에서의 열전달 계산식

증발기와 응축기에서 적절하게 열전달 방정식을 적용하는 것은 전체 시스템의 성능을 정확히 계산하는데 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 증발기와 응축기의 열전달 효율은 대수평균온도차(Log Mean Temperature Difference, LMTD)로 정의하였다. 각 냉매에 대해서 상관없이 증발용량이 일정하다고 가정했으므로 증발기의 총괄 열전달 계수와 전열 면적의 곱(UA) 또한 정의된 상수로 줄 수 있다. 열전달 해석을 위해 Fig. 2에서 보는 바와 같이 증발기는 과냉영역, 2상영역, 과열영역의 세 부분으로 나누었으며 반면에 응축기는 과냉영역과 2상영역의 2부분으로 나누었다. UA 값과 LMTD 값을 준 경우에 작동유체와 해수사이의 열교환은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.⁽⁹⁾

$$UA_e = UA_{sube} + UA_{tpe} + UA_{supe} \quad (1)$$

$$\frac{1}{LMTD_e} = \frac{f_{sube}}{LMTD_{sube}} + \frac{(1 - f_{sube} - f_{supe})}{LMTD_{tpe}} + \frac{f_{supe}}{LMTD_{supe}} \quad (2)$$

$$UA_c = UA_{subc} + UA_{tpc} \quad (3)$$

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

e : evaporator, c : condenser

sub:subcooling, sup:superheating, tp:two-phase

여기서 f는 증발기 및 응축기의 각 부분에서의 열량이며 LMTD는 대수평균온도차이다.

해석의 단순성을 위해 증발기와 응축기의 압력 강하는 무시하였다.

2.3 정상 상태의 열 시스템 모델링

정상 상태에서의 열 시스템 모사는 화학 공장, 발전소, HVAC 기기들의 설계와 최적화에 많이 이용되고 있다. 1971과 1989년에 Stoecker는 정상 상태의 열시스템 모사에 대한 일반적인 프로그램을 소개하였다.⁽¹⁰⁾ 특히 1989년에는 Successive Substitution(SS)방법과 뉴튼-랩슨(NR)방법을 이용하여 정상 상태에서의 열 시스템의 많은 미지수를 동시에 푸는 방법을 제시하였다.⁽¹¹⁾ 1991년에 Jung과 Radermacher는 복잡한 시스템의 모사에 있어서 SS방법보다는 NR 방법을 이용하는 동시 해석 방법이 더 우수함을 증명하였다.⁽⁹⁾ SS방법은 테스트 조건을 만족시키기 위해 내부의 많은 루프를 만족시키면서 계산을 반복하는 것에 반해 NR방법은 일련의 비선형 방정식을 전체적으로 한꺼번에 풀게 된다. 또한 시스템 모사에서 모든 변수들이 비선형적으로 연관이 되어 있으므로 비선형 방정식에 대한 풀이 방법이 필요하게 된다. 이밖에 몇몇 알고리즘이 있기는 하지만 NR 방법이 가장 보편적으로 사용되고 있으며 본 연구에서도 이를 채택하였다.

2.4 작동유체

지난 몇 십년동안 폐쇄형 OTEC 사이클에 사용하기 위해 다양한 물질들이 제안된바 있다. 그 중의 하나가 우수한 전달 물성치를 가지고 있으며 쉽게 구할 수 있고 가격이 싼 암모니아이다. 그러나 암모니아는 독성과 가연성이 있으며 또한 매우 역겨운 냄새를 가지고 있다. 이런 좋지 않은 특성 때문에 CFC와 HCFC로 알려져 있는 불화 탄소가 제안되었다. 특히 HCFC22는 사용하기에 편하고 안전하며 암모니아와 비슷한 증기압을 가지고 있기 때문에 암모니아를 대신하여 사용되었다. 그러나 HCFC22는 몬트리얼 의 정서에 의해서 생산 및 사용에 규제를 받고 있는 오존분괴물질이다. HCFC22는 이미 1996년부터 선진국에서는 사용량에 규제를 받고 있으며 전세계적으로 2020년까지는 완전히 사용이 금지되게 된다. 따라서 지난 10여년간 성층권 오존의 붕괴로 인하여 CFC와 HCFC를 대체할수 있는 여러가지 유체들이 개발되었다. 그러나 OTEC 발전 시스템에서 이러한 유체들의 성능은 아직까지 연구된 적이 없다.

1985년에 Anderson은 100MW급 해상 설치형 폐쇄 OTEC 발전소의 작동유체로서 프로필렌 (R1270)을 제안하였다.⁽¹²⁾ 프로판, 프로필렌 등의 탄화수소는 매우 우수한 열역학적 성질을 가지고 있으나 가연성때문에 특정한 적용사례를 제외하고는 그 사용이 금지되어 왔다. 그러나 나날이 환경에 대한 관심이 증가하면서 냉동분야에서는 자연냉매로서 탄화수소에 관심이 증가하고 있다. 그러므로 미래의 OTEC 기술의 발전을 위해서 탄화수소의 성능을 연구하는 것은 매우 중요하다. Table 1은 냉매의 번호 순서대로 본 연구에서 사용한 여러 가지 작동유체의 물성치들 중 중요한 것들을 보여준다. 잘 알려진 바와 같이 발전소의 크기는 작동유체의 증기압에 의해 좌우된다. 높은 증기압의 유체를 사용하는 시스템은 특히 증발기에서 높은 압력을 견뎌야

하므로 파이프와 열교환기의 벽두께가 증가하는 반면 터빈과 열교환기의 크기는 감소하게 된다. 그러므로 OTEC 시스템을 설계할 때는 작동유체의 특성을 고려하여 조건에 맞도록 적정설계를 해야만 한다.

Table 1. Thermophysical properties of various working fluids

Fluids	Mw	NBP	Tcrit	Pcrit	ODP	GWP
	(kg/kmol)	(°C)	(°C)	(kPa)		
R22	86.47	-40.8	96.2	4990	0.05	1700
R32	52.02	-51.7	78.2	5800	0.00	580
R125	120.02	-48.1	66.3	3630	0.00	3200
R134a	102.03	-26.1	101.1	4060	0.00	1300
R143a	84.04	-47.2	73.6	3830	0.00	4400
R290 (Propane)	44.10	-42.1	96.8	4250	0.00	3
R410A (50%R32/50%R125)	72.59	-51.4	84.9	4950	0.00	1370
R717 (Ammonia)	17.03	-33.3	133.0	11420	0.00	<1
R1270 (Propylene)	42.09	-47.7	92.4	4620	0.00	3

Mw: Molecular weight, NBP: Normal boiling point, Tcrit and Pcrit : Critical temperature and pressure
ODP : Ozone depleting potential, GWP: Greenhouse warming potential(100 years)

3. 결과 및 토의

3.1 작동유체의 영향

Table 2. Standard operating condition for a closed OTEC Power Plants

Warm sea water inlet temperature	28°C
Temperature difference of warm sea water(ΔT_{sw})	3°C
Cold sea water inlet temperature	4°C
Temperature difference of cold sea water(ΔT_{csw})	3°C
Degree of superheat(DSH)	2°C
Degree of subcooling(DSC)	2°C
Log Mean Temperature Difference in Evaporator(LMTD _e)	3°C
Log Mean Temperature Difference in Condenser(LMTD _c)	3°C
UA in Evaporator	50kW/°C

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 9개의 작동유체의 Rankine 사이클 효율을 보여준다. 열효율 등은 Table 2에 있는 표준조건하에서 계산했으며 앞으로 달리 언급하지 않는 한 해수측의 펌핑동력을 제외한 사이클의 총출력(터빈출력-펌프동력)을 증발용량으로 나눈 값을 Rankine 사이클의 효율로 간주하였다. Fig. 3으로부터 쉽게 알 수 있듯이 이번에 고려한 모든 유체의 열효율 차이는 매우 작다. 이 중 암모니아가 가장 높은 효율을 보이지만 암모니아와 가장 효율이 낮은 R125와의 효율 차이는 암모니아를 기

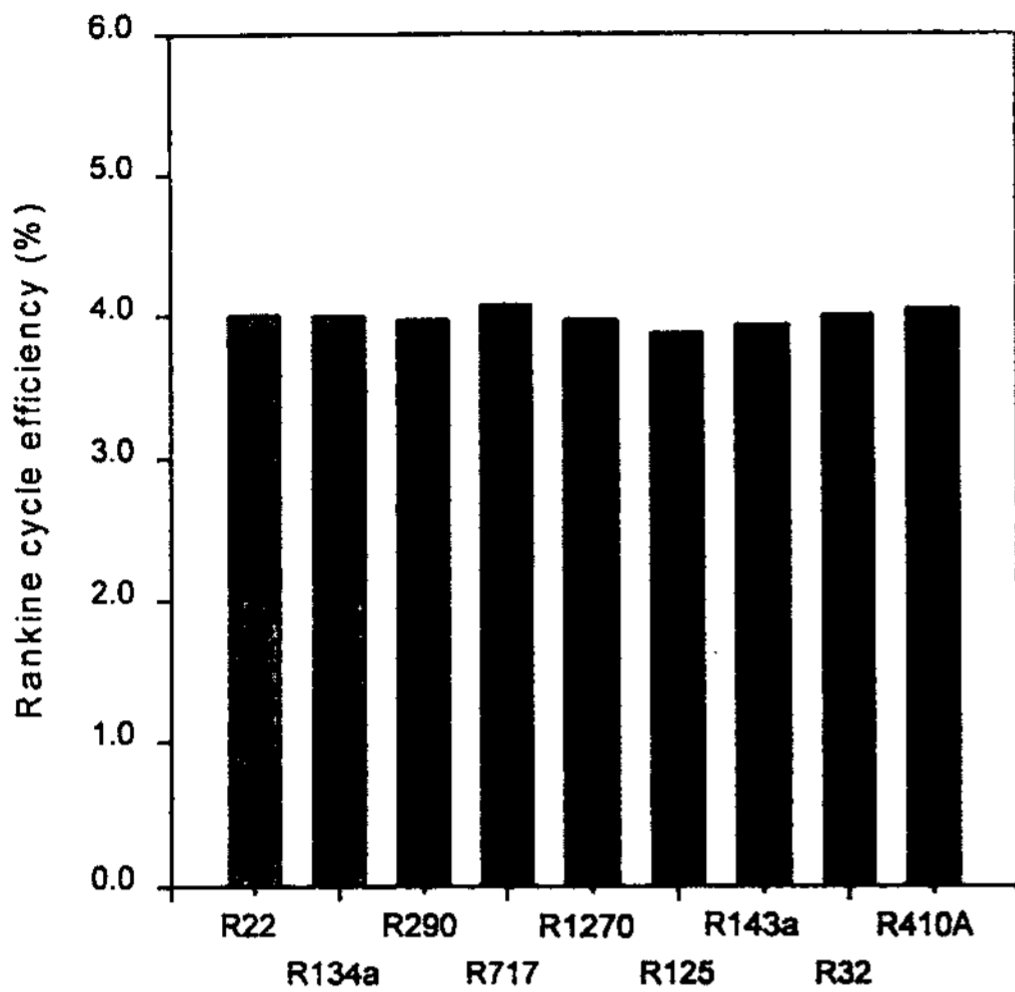


Fig. 3 Rankine cycle efficiency of various working fluids

준으로 하였을 때 약 5%에 불과하다. 이 결과로부터 OTEC 사이클의 작동유체를 결정할 때 유체 자체의 열효율은 그다지 중요하지 않음을 알 수 있다. 특히 환경에 무해한 R32와 R410A, 그리고 지금도 널리 사용되고 있는 R22는 암모니아와 거의 비슷한 효율을 나타내므로, 장기적으로 혹은 잠정적으로 이들을 사용하는 것이 매우 유리함을 알 수 있다.

Fig. 4는 R22를 기준으로 한 각 작동유체의 상대적 터빈의 크기를 보여준다. 터빈의 크기는 증발기 용량을 터빈 입구의 체적으로 나눈 값으로 정의할 수 있으며, 비체적이 클수록 터빈 크기는 커지게 된다. Fig. 4를 통해 알 수 있듯이, R32와 R410A를 사용하면 많은 연구자들이 제안한 R22와 암모니아를 사용하는 경우보다 터빈 크기가 작아짐을 알 수 있다. 위에서 언급했듯이 OTEC 발전 시스템의 상업화를 가장 크게 방해하는 요소 중 하나는 초기에 들어가는 막대한 설치비용 때문인데 R32와 R410A를 사용하게

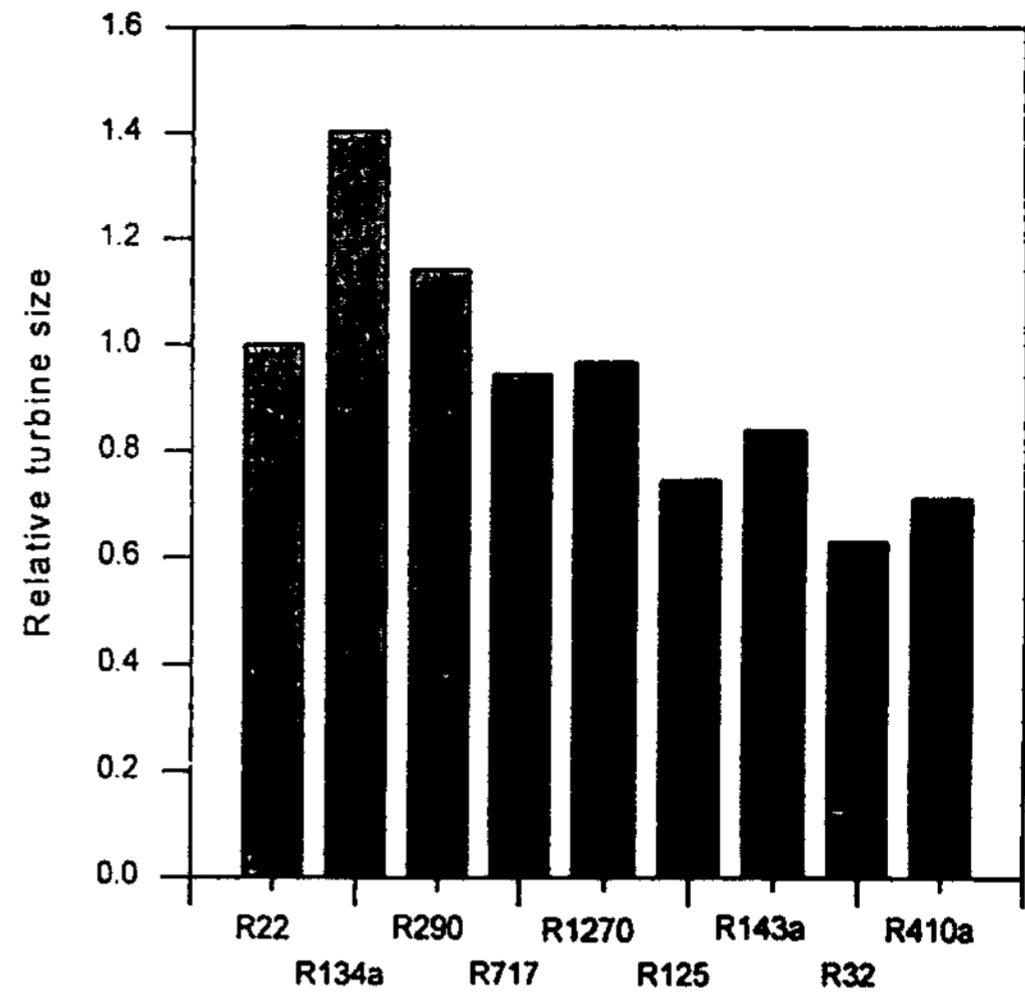


Fig. 4 Relative turbine size of various working fluids (Base fluid:R22)

되면 터빈의 크기가 작아지므로 초기 설치 비용 또한 줄어들게 된다. 이 경우에 증발기에서의 R32와 R410A의 증기압은 약 1600kPa고 이 정도 압력은 산업현장에서 쉽게 사용할 수 있는 압력이다.

3.2 해수 온도의 영향

모든 유체에 대하여 해수 온도가 미치는 영향이 유사하기 때문에 지금부터는 R22에 대해서만 언급하려 한다. Fig. 5와 Fig. 6는 Table 2에 있는 표준조건하에서 각각 표층수(Warm sea water inlet temp.)와 심층수(Cold sea water inlet temp.) 온도를 변화시켰을 때 효율의 변화를 나타낸다.

Rankine 사이클의 효율은 우리가 생각하는 바대로 표층수의 온도가 상승하는 것과 비례해서 상승하고 또한 심층수의 온도가 낮아질수록 반비례하여 상승하는 것을 알 수 있다.

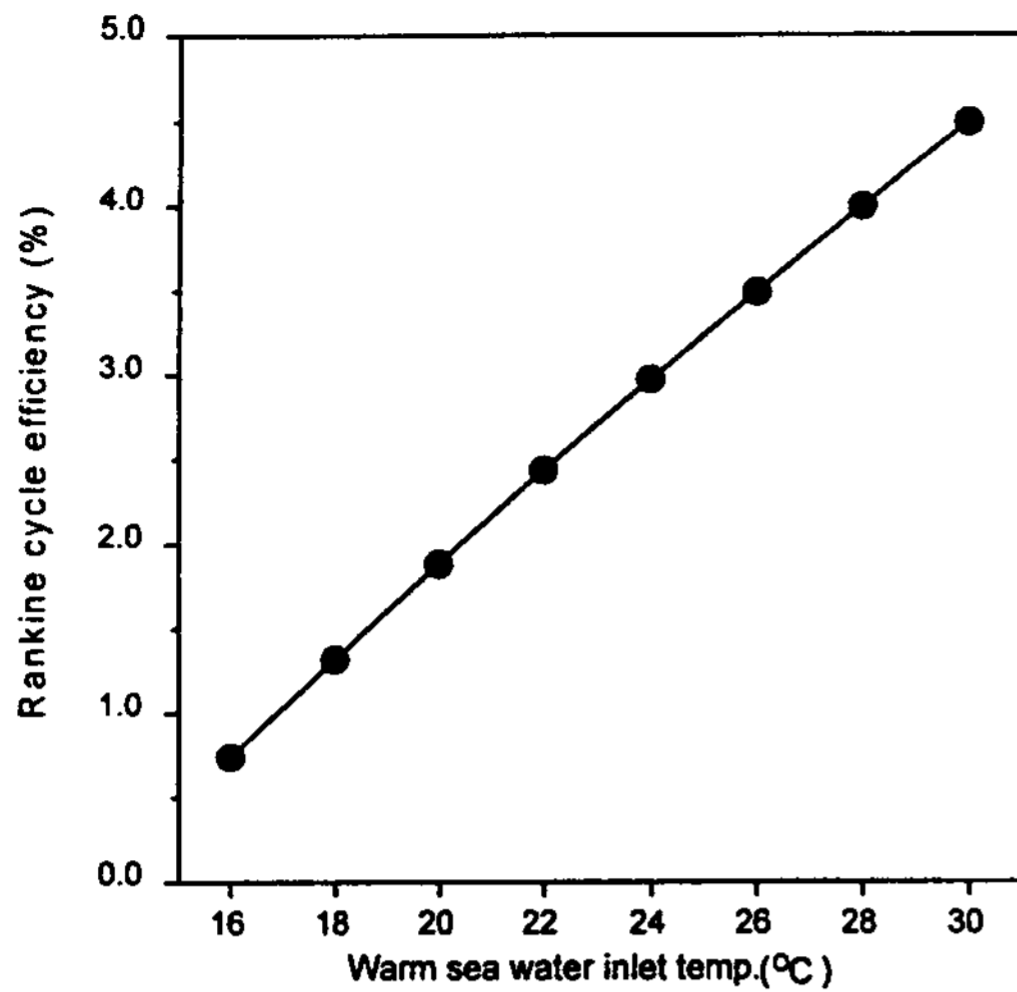


Fig. 5 Effect of warm sea water inlet temperature on Rankine cycle efficiency

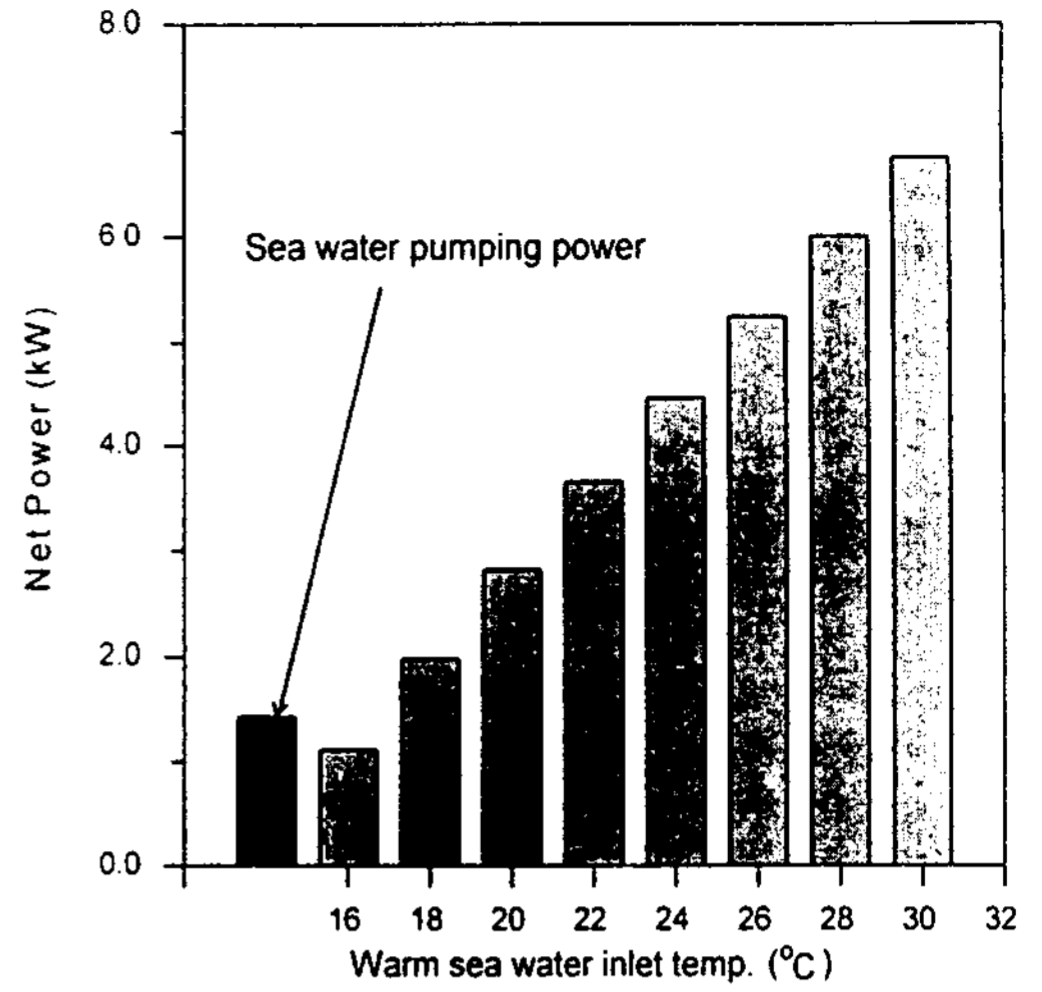


Fig. 7 Effect of warm sea water inlet temperature on Rankine cycle efficiency

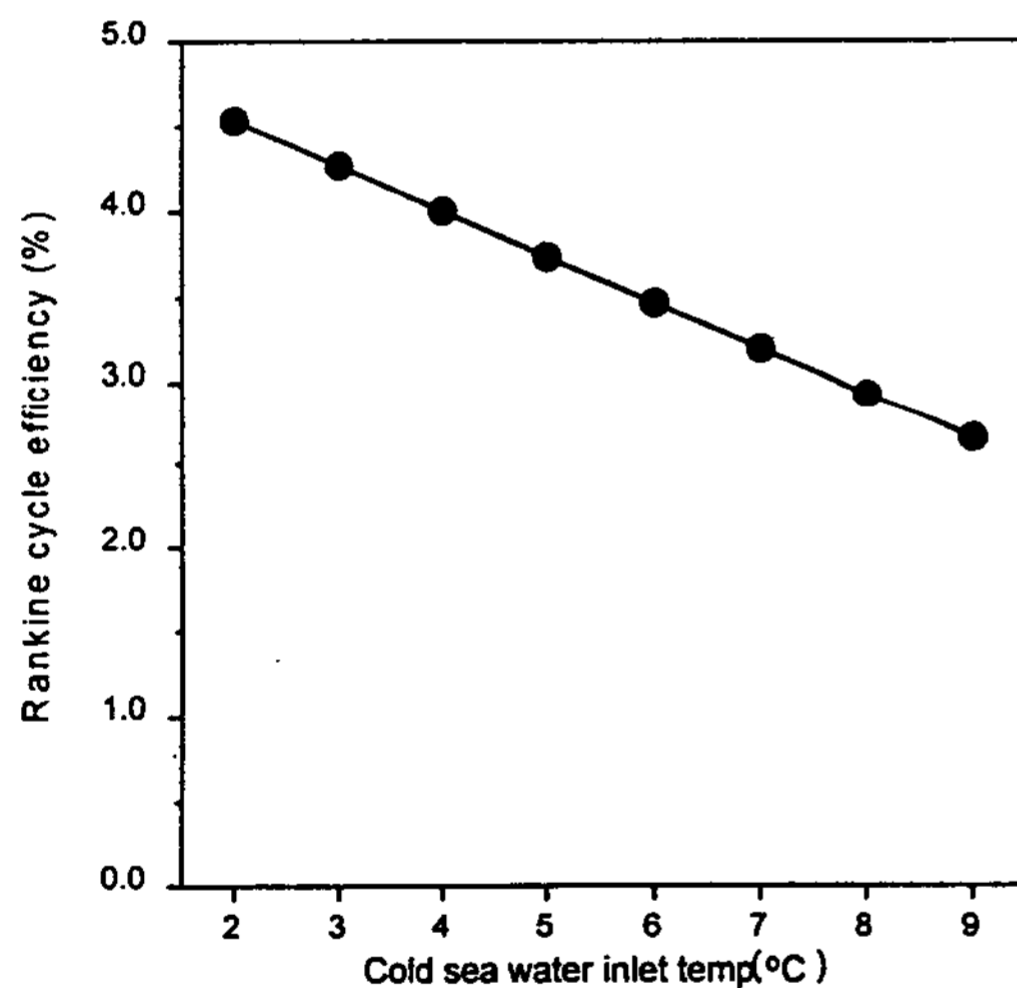


Fig. 6 Effect of cold sea water inlet temperature on Rankine cycle efficiency

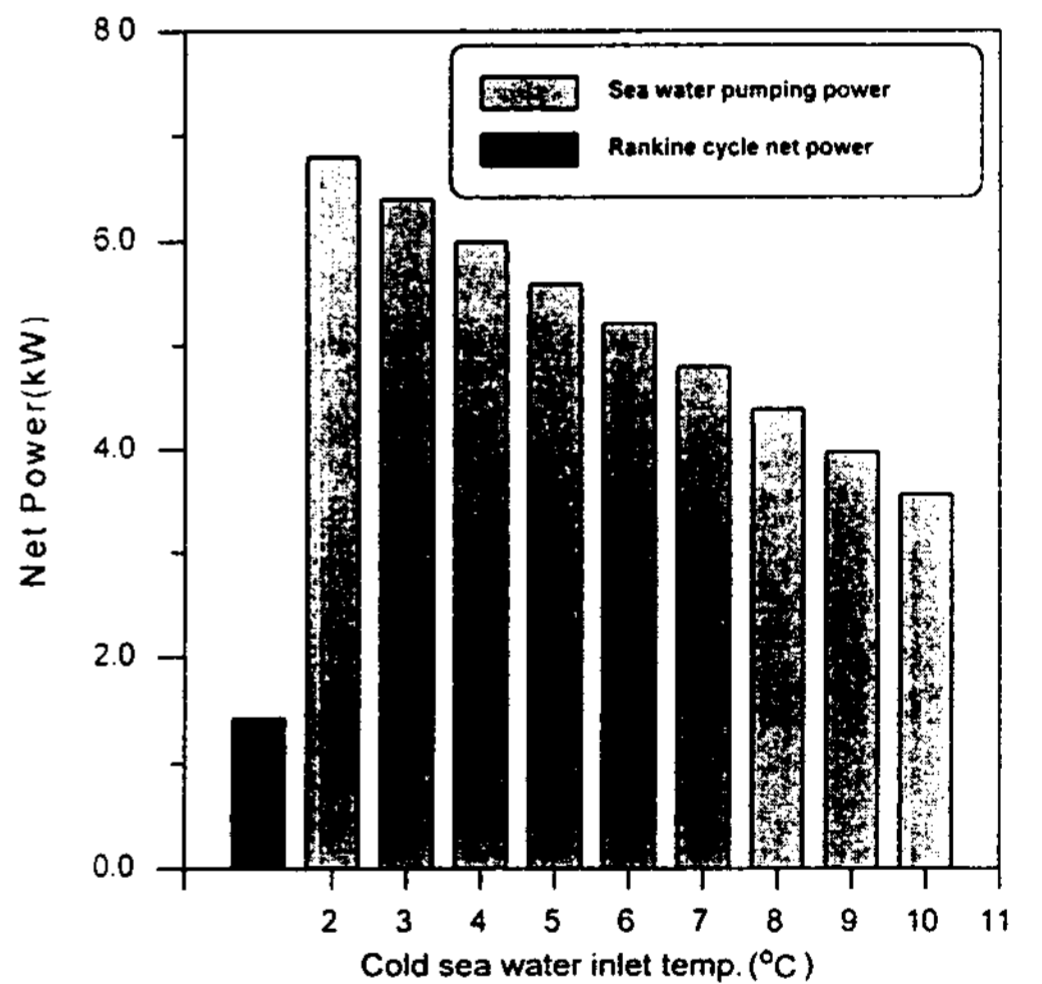


Fig. 8 Effect of cold sea water inlet temperature on Rankine cycle efficiency

Fig. 7과 Fig. 8은 해수의 온도에 따른 총 출력의 변화를 나타낸다. 해수측 펌프일을 계산하기 위해 심층수 및 표층수측의 압력강하를 모두 50kPa로 가정하였다. 따뜻한 표층수와 차가운 심층수사이의 온도차가 13°C 이하일 경우 해수를 펌핑하는데 소요되는 동력이 시스템의 총 출

력을 초과하기 때문에 OTEC 발전 시스템의 효율은 0이 된다. 그러므로 폐쇄형 OTEC 사이클로부터 전기를 생산하기 위해서는 해수사이의 온도차가 20°C정도는 되어야 한다는 것을 알 수 있다.

3.3 과열도와 과냉도의 영향

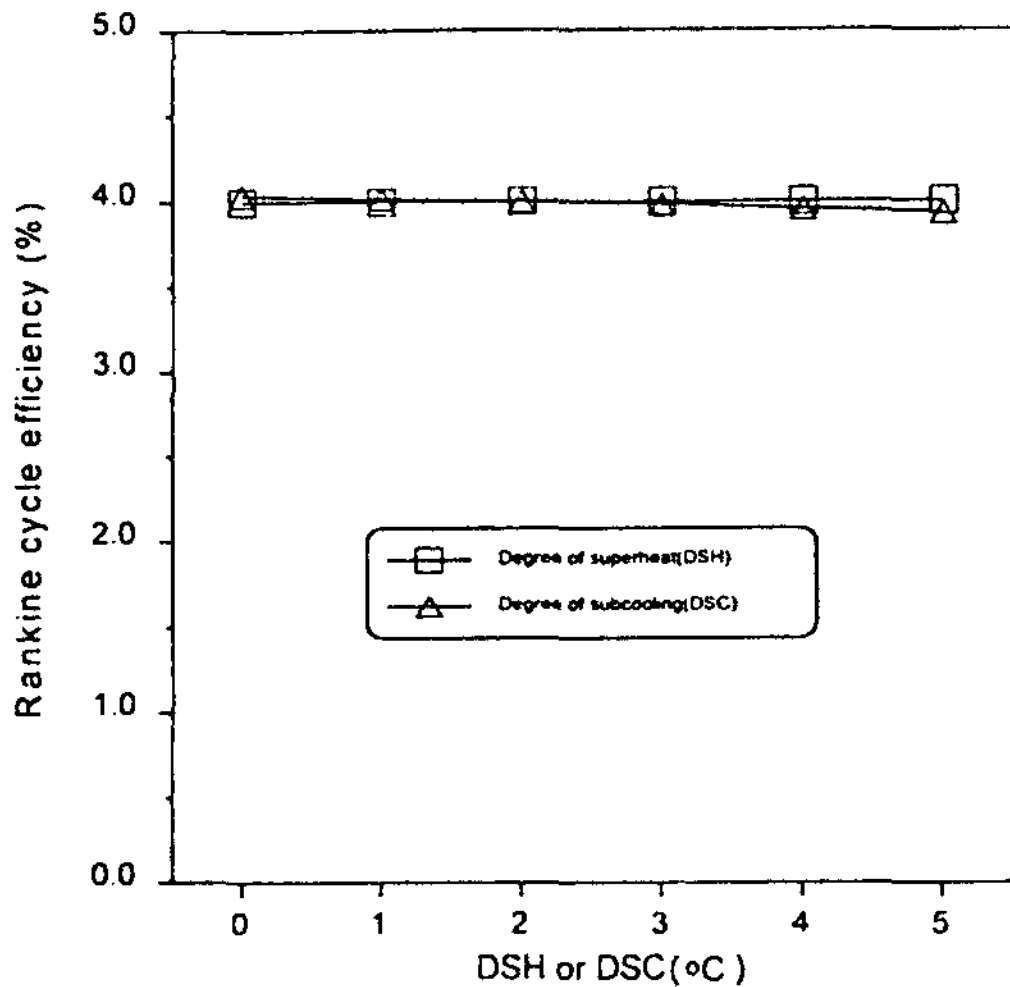


Fig. 9 Effects of superheating and subcooling on Rankine cycle efficiency

실제 OTEC 발전 시스템에는 증발기에서 발생된 증기가 어느 정도 과열될 것이고 응축기에서 응축된 액체는 냉매를 펌핑할 때 생길지도 모르는 공동현상을 방지하기 위해 과냉을 시켜야만 한다. Fig. 9는 과열도(DSH)와 과냉도(DSC)가 시스템 효율에 미치는 영향을 나타내었는데, 이 결과로부터 과열도와 과냉도는 시스템의 효율에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.4 터빈 효율의 영향

실제 해수의 온도차는 제한되어 있으므로 OTEC 발전 시스템의 효율은 개개의 구성요소에 의해 크게 좌우된다. 무엇보다도 터빈의 효율은 매우 중요하다. Fig. 10은 터빈의 등엔트로피 효율에 따라 시스템 효율이 어떻게 변하는가를 보여주며, Rankine 사이클의 효율은 터빈의 효율에 따라 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

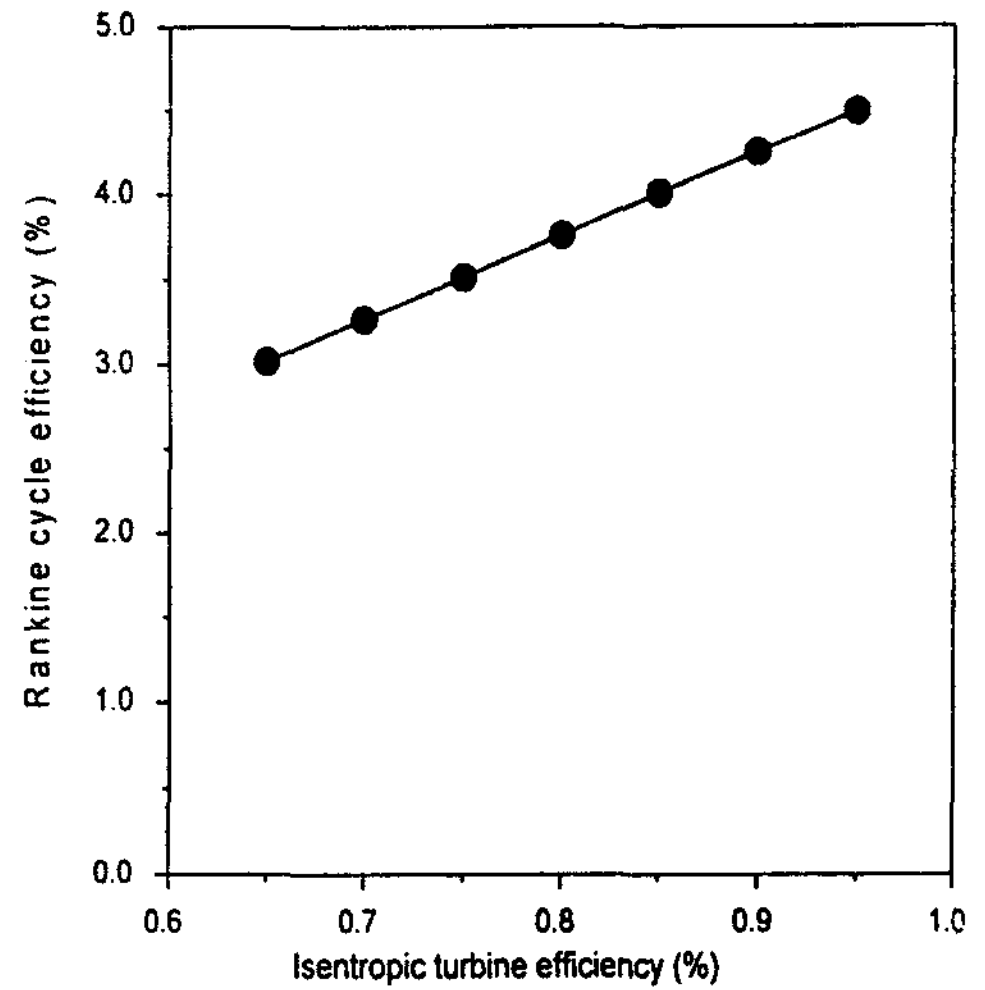


Fig. 10 Effects of turbine efficiency on Rankine cycle efficiency

3.5 열교환기 성능의 영향

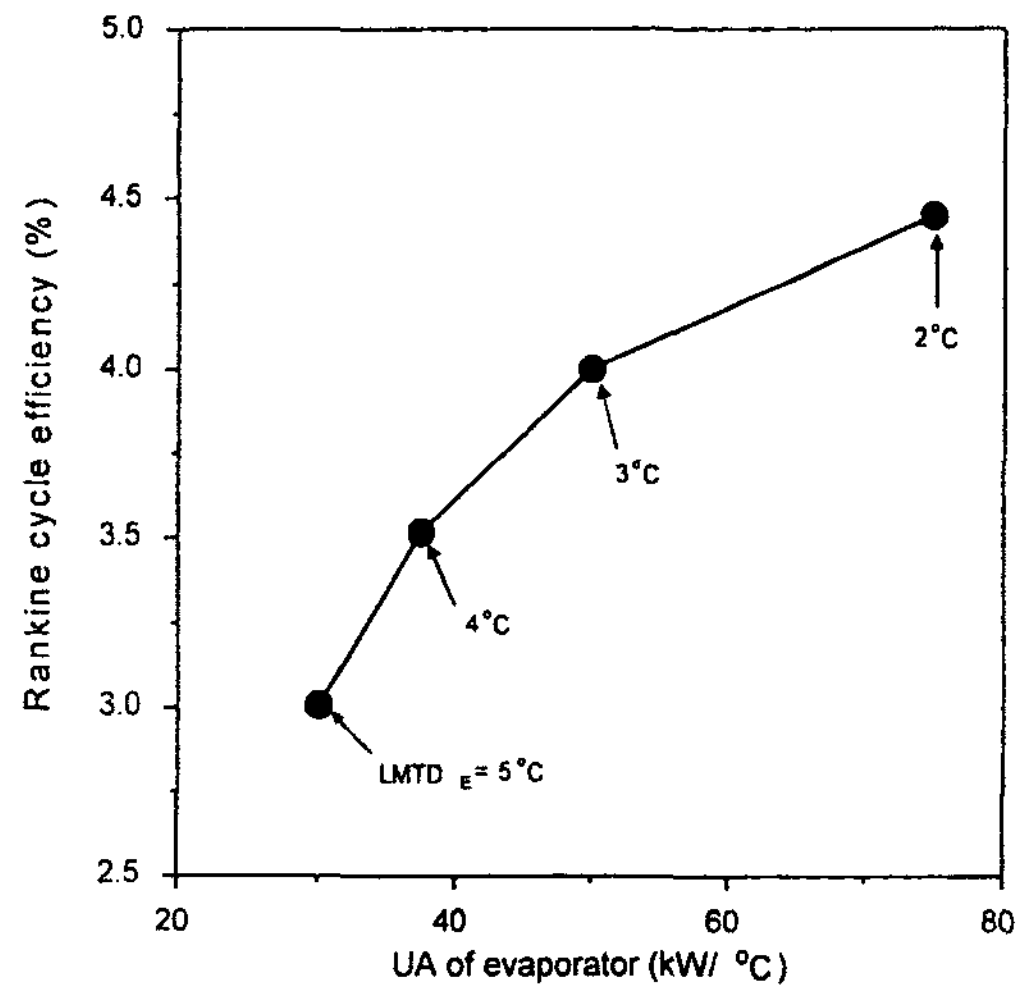


Fig. 11 Effect of heat exchanger size on Rankine cycle efficiency

지난 20여년 동안 열교환기 부분에서는 다양한 용도에 쓰일 고효율 열교환기를 생산하기 위해 많은 노력이 있어왔다. 특히 우수한 가격성능비, 우수한 열교환 능력 그리고 압력 강하 특성을

가진 고효율의 판형 열교환기가 많이 개발되어 보급되었다. 폐쇄형 OTEC 시스템은 분명히 이러한 열교환기의 발전으로 인하여 많은 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 11은 열교환기의 크기에 따른 시스템 효율의 변화를 보여주는데 2°C이하의 대수평균온도차를 갖는 열교환기의 시스템 효율이 매우 우수함을 알 수 있다. 현재의 고밀도 열교환기 기술로는 2°C정도의 대수평균온도차를 갖는 열교환기를 만드는 것이 그리 큰 문제가 되지 않으므로, 앞으로 실제 OTEC 사이클을 개발하는데 큰 문제는 없을 것으로 본다.

4. 결론

본 연구에서는 OTEC 발전을 위한 Rankine 사이클을 연구했고, 전산 해석을 통해 정상 상태의 시스템 효율을 계산하였다. 그리고 시스템 성능에 미치는 변수들을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 아홉 개의 작동유체를 고려했고 시스템 성능이 작동유체에 상관없이 거의 일정하다는 것을 알게 되었다. 초기 투자비용, 환경 영향 등을 고려할 때 이 중에서도 환경에 무해하고 독성이 없는 R410A와 R32가 폐쇄형 OTEC 사이클의 작동유체로서 가장 적합할 것으로 보인다.

(2) 폐쇄형 OTEC 발전 시스템은 따뜻한 표층수와 차가운 심층수의 온도차가 20°C이상일 때 전기를 생산할 수 있음이 밝혀졌다.

(3) 증발기 출구에서의 과열도와 응축기 출구에서의 과냉도는 시스템 성능에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

(4) 시스템의 성능은 터빈의 등엔트로피 효율에 비례하였다.

(5) 2°C이하의 대수평균온도차를 갖는 열교환기를 사용했을 때 폐쇄형 OTEC 사이클의 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 과기처 특정과제인 “해양온도차 발전 기술 개발”의 일환으로 수행되었으며, 이에 관련 기관에 감사를 드린다.

참고문헌

1. Avery, W.H., and Wu, C : “Renewable Energy From the Ocean: A Guide to OTEC”, Oxford University press, Oxford, England(1994)
2. Takahashi, P, and Trenka, A. : “Ocean Thermal Energy Conversion”, John and Wiley & Sons, Chichester, England(1996)
3. Tanner, M. : “OTEC-A Clean energy Whose Time Has Come”, Emerging Technology Series, Marine Industrial Technology, United Nations Industrial Development Organization, Vienna, 1996, 1
4. D'Arsonal, A. : “Utilisation de forces naturelles”, Revue Scientifique, 2(1881), 370
5. Claude, G. : “Power from the Tropical Seas”, Mechanical Engineering, 52(1930), 1039
6. Uehara, H, and Ikegami, Y. : “Optimization of a Closed-Cycle OTEC System”, J. of solar energy Engineering, 112(1990), 247~256
7. Vadus, J. : “A strategy for OTEC Commercialization”, Processing of the 1997

- International OTEC/DOWA Association, 1997, 235~247
8. Korea Power Company : "A Study on the Development of Ocean Thermal Energy Conversion and Wave Power Generation System" ,Technical report, KRC-89G-T10
 9. Jung, D.S., and Radermacher, R. : "Performance Simulation of Single-Evaporator Domestic Refrigerators Charged With Pure and Mixed Refrigerators" ,Int. J. Refrigeration, 14(1989~1991), 223~232
 10. Stoecker, W.F. : "A Generalized Program for Steady-State system Simulation" , ASHRAE Transaction., 77(1971), 140~148
 11. Stoecker, W.F. : "Design of Thermal Systems " ,3rd ed, McGraw-Hill Book Comp.(1989)
 12. Anderson, J.H. : "Ocean Thermal Power: The Coming Energy Revolution" , Solar and Wind Technology, 2(1985), 25Nomenclature

A Study of Closed OTEC Power Plants

Sang ho Shin^{*}, Dong soo Jung^{}, Chong-Bo Kim^{**},
Tae beom Seo^{**} Won gee Chun^{***}, P. Chung moo Auh^{****}**

^{*}, ^{**} *Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon, 402-751*

^{***} *Dept. of Energy Engineering, Cheju National University, Cheju, 690-751*

^{****} *Science & Technology Policy Institute, Seoul, 100-430.*

Abstract

In this paper, performance of various working fluids is evaluated for the closed Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) power plant operating on Rankine cycle. The evaporator and condenser are modeled via UA and LMTD method while turbine and pump are modeled by specifying isentropic efficiencies. R22, Propane, Propylene, R134a, R125, R143a, R32, R410A and Ammonia are used as working fluids. Results show that newly developed fluids such as R410A and R32 that do not cause stratospheric ozone layer depletion perform as well as R22 and ammonia. The superheat at the evaporator exit and subcooling at the condenser exit do not affect the performance of the simple OTEC power cycle. Turbine efficiency and heat exchanger size influence greatly the performance of the Rankine cycle. Finally, it was shown that closed OTEC power plants can practically generate electricity when the difference in warm and cold sea water inlet temperatures is greater than 20°C.