



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

발전 및 해수담수화를 위한 태양열
해양온도차 시스템 성능평가

濟州大學校 大學院

에너지 工學科

梁 鎔 宇

2016年 8月

발전 및 해수담수화를 위한 태양열 해양온도차 시스템 성능평가

指導教授 金南鎮

梁 鎔 宇

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2016年 6月

梁鎔宇의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 李潤俊 (印)

委員 金南鎮 (印)

委員 朴成植 (印)

濟州大學校 大學院

2016年 6月

Performance Evaluation of Solar-OTEC (ocean thermal energy conversion) system for power generation and seawater desalination.

Yong Woo Yang

(Supervised by professor Nam Jin Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science

2016. 6.

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Nam Jin Kim, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

Yoon Joon Lee

Nam Jin Kim

Sung Seek Park

2016. 6.

Date

Department of Nuclear & Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vii
SUMMARY	viii
I. 서 론	1
II. 이론적 배경	5
1. 해양온도차발전	5
1) 폐쇄형 사이클	6
2) 개방형 사이클	8
3) 재생사이클	10
4) 칼리나 사이클	11
5) 혼합형 사이클	12
2. 태양열-복합 OTEC 시스템	14
1) 태양열-개방형 OTEC 시스템	14
2) 태양열-혼합형 OTEC 시스템	16
III. 시스템 해석방법	18
1. 시스템 모델링	18
1) 기화기	21

IV. 시스템 해석 결과 및 고찰	24
1. 태양열-개방형 OTEC 시스템 성능 분석 결과	24
1) 공급온도와 포화온도차에 따른 시스템 성능비교	24
2) 기화기 압력에 따른 성능비교	28
2. 태양열-혼합형 OTEC 시스템 성능 분석 결과	32
1) 작동유체에 따른 성능비교	32
2) 공급온도에 따른 성능비교	37
3. 태양열-OTEC 시스템 태양열 집열기 면적 산정	40
V. 결 론	43
참 고 문 헌	45

감사의 글

LIST OF FIGURES

Fig. 1. Vertical temperature distribution of seawater	4
Fig. 2. Schematic diagram of a closed system	7
Fig. 3. Schematic diagram of open OTEC system	9
Fig. 4. Schematic diagram of a regenerative system	10
Fig. 5. Schematic diagram of a Kalina system	11
Fig. 6. Schematic diagram of a hybrid system	13
Fig. 7. Schematic diagram of solar-open OTEC system	15
Fig. 8. Schematic diagram of solar-hybrid OTEC system	17
Fig. 9. Conceptual diagram of flash evaporator	22
Fig. 10. Diagram of base open OTEC system	25
Fig. 11. Solar-open OTEC system netpower for saturation temperature difference	25
Fig. 12. Solar-open OTEC system efficiency for saturation temperature difference	27
Fig. 13. Solar-open OTEC system system Fresh water for saturation temperature difference	27
Fig. 14. Comparison of the Net power as a function of the flash evaporator pressure	29
Fig. 15. Comparison of the system efficiency as a function of the flash evaporator pressur	29
Fig. 16. Comparison of the fresh water production as a function of the flash evaporator pressure	31
Fig. 17. System efficiency netpower and fresh water enhancement ratio as a function of the flash evaporator pressure	31
Fig. 18. Diagram of base hybrid OTEC system (R134a)	34
Fig. 19. Base hybrid OTEC system's Net power using various working	

fluids	34
Fig. 20. Comparison of fresh water production with various working fluids	35
Fig. 21. Base hybrid OTEC system's efficiency using various working fluids	35
Fig. 22. Comparison of relative turbine sizes with various working fluids	36
Fig. 23. Net power for warm sea water inlet temperature	38
Fig. 24. System efficiency for warm sea water inlet temperature	38
Fig. 25. Fresh water for warm sea water inlet temperature	39

LIST OF TABLES

Table 1. System operating conditions	19
--	----

SUMMARY

Ocean thermal energy conversion(OTEC) is a electric power generation method that utilizes temperature difference between the warm surface seawater and cold deep seawater of ocean. As potential sources of clean-energy supply, OTEC power plants' viability has been investigated. However, The OTEC system has problems of low efficiency and high investment cost because the temperature difference between the surface and the deep sea is small, long pipe line and pumping cost for using cold deep water.

Therefore, in this present study, the OTEC system combines with solar system. It evaluated the thermodynamic performance of solar-OTEC convergence system for the simultaneous production with electric power and desalinated water. The performance analysis of solar-OTEC convergence system was carried out as the fluid temperature, saturated temperature difference and pressure of flash evaporator under equivalent conditions. The results showed that the performance of solar-open OTEC system is the highest at the flash evaporator pressure of 10 kPa. At this time, the system efficiency, electric power and desalination production enhancement ratios were approximately 3.9, 13.9, 5.1 times higher than that of the base open OTEC system, respectively.

The results showed that maximum system efficiency, electric power and fresh water output of solar-open OTEC system show at 40, 10, 2.5 kPa of the flash evaporator pressure, respectively. And the irrespective enhancement ratios were approximately 15.3, 5.3, 8.6 times higher than that of the base

open OTEC system. Also, performance of solar-OTEC system is the highest in the flash evaporator pressure of 10 kPa.

Also, the performance of solar-hybrid OTEC system is the highest at the inflow fluid temperature of evaporator of 80°C. The system efficiency, electric power and desalination production enhancement ratios were approximately 3.4, 3.5, 14.4 times higher than that of the base hybrid OTEC system.

I. 서론

현재 인류는 급격한 산업화의 발달로 엄청난 양의 화석연료를 소모하고 있다. 일반적으로 발전소 운영에 공급되는 석탄과 오일 등의 무분별한 사용으로 천연 자원의 고갈과 화석연료를 사용함으로써 온실가스 증가와 지구 온난화 등과 같은 환경문제의 심각화가 진행되는 가운데 에너지문제가 가장 긴급한 과제 중 하나로 대두되고 있다. 이러한 에너지 문제의 중요한 관점은 다양성, 지속가능성, 친환경성으로 재생 가능한 에너지의 이용 촉진이 유력한 해결책으로 주목받고 있으며 재생 가능한 에너지 중에서도 에너지의 밀도, 규모, 안정성 등의 문제를 해결할 수 있는 대표적인 에너지로는 해양에너지가 있다.

지구표면의 약 71%를 차지하며, 면적이 3억 6,100만 km²로서 지구상 동·식물의 80%가 서식하는 해양은 무한한 자원의 보고이며 경제발전의 원동력이다. 해양은 매년 37조 kWh의 에너지를 흡수하고 있으며, 이는 현재 인류가 사용하는 전기 용량의 4000배에 달한다. 또한 1 km² 해양표층에 함유된 에너지는 석유 3800 배럴에 달한다. 따라서 해양에너지원은 재생 가능한 에너지 중에서도 에너지 밀도, 규모, 안전성의 관점에서 화석에너지를 대체할 수 있는 차세대 에너지원으로 주목받고 있다.

환경문제에 무해하고 무한한 대체에너지인 해양에너지 이용 기술은 이산화탄소 배출 없이 전기를 생산하기 위해 깨끗한 에너지를 공급하는 유망한 방법으로 간주되고 있으며 해양에너지의 이용 기술에는 조력 파력 해양온도차 발전 등이 있다. 이 중 무공해 발전 시스템으로서 연구되어온 기술 중 하나가 해양 온도차 발전 (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) 이다. 해양의 수면 아래로 100m 정도의 해수는 태양에너지의 일부가 열로 축적되고 있으며 저위도 지방에서는 연중 26 ~ 30℃ 정도로 유지되고 600 ~ 700 m 사이에 있는 1 ~ 7℃ 정도의 심층수를 취수하고 온도차를 이용하여 발전하게 된다.

Fig. 1은 열대 및 아열대 지역 해수의 수직 온도 분포를 보여준다. 이러한 해양온도차발전은 해양에너지 중에서도 특히 에너지규모 복잡이용 안정성 등에서 가장 유효한 에너지원으로서 그 실용화가 기대되고 있으며 또한 100MW급의 OTEC 발전시스템은 연간 140,000 탄소톤의 CO₂를 저감할 수 있다.

해양온도차발전의 개념은 1881년 프랑스의 Jacques Arsene d'Arsonval의 논문을 통해 최초로 제안되었으며 이후 세계 최초의 온도차발전 실험은 1926년 프랑스의 S. Claude에 의해 Labscale 규모에서 실시되면서 해양심층수를 이용한 온도차 발전을 실증하려는 연구는 1960년대까지 다발적으로 시도 되었으나 석유의 대량 공급으로 실용화되지 못하였다. 그러나 1973년 제1차 석유파동 이후 다시 본격적인 연구가 이루어지게 되었으며 미국과 일본 등지에서 소규모 해양 실증플랜트가 건설되어 실험이 실시되었다.

국외에서는 미국, 일본 등지에서 소규모 해상실험이 실시되고 있으며, 미국은 1978~1979년까지 미국 하와이에서 50 kW급 해상형 폐쇄순환식 온도차 발전플랜트 'Mini-OTEC' 실험을 성공하고, 1993년에 하와이 NELHA(Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority)에 210 kW급 육상형 개방순환식 온도차 발전플랜트 실험을 성공하였다. 또한 일본은 1982~1985년에 남태평양의 나우루 공화국(120 kW 육상형 폐쇄순환식), 큐슈 서남쪽에 위치한 토쿠시마(50 kW, 육상형 폐쇄순환식), 사가대학(75 kW, 육상형 폐쇄순환식) 등에서 운전실험에 성공하였다. 대만 등은 1980년대부터 해양온도차 발전의 실용화에 관심을 가지고 체계적인 준비를 해왔으며 인도는 2002년부터 2006년까지 1 MW급 해상형 해양온도차 발전플랜트 실험을 실시하였다.

국내에서는 2000년부터 인하대학교에서 해양온도차 발전을 위한 핵심기술 기초 연구로 20 kW급 해양온도차 파일럿 플랜트 성능실험을 수행하였으며, 2001년에는 해양연구원에서 OTEC 플랜트 구조물 개발 연구가 수행되었다. 최근에는 국토해양부에서 '10 ~'15년간 연구개발 사업으로 '해수 온도차 에너지 이용기술 개발 사업' 추진을 계획했으며, 이 계획의 2단계로 심층수와 발전 온배수를 활용

한 온도차 발전 파일릿 플랜트(50 kW급)를 개발하게 될 예정이다.

그러나 여전히 해양온도차 발전에 대한 연구는 극히 제한적이며, 기존의 해양온도차 발전기술과는 차별화 되는 본 기술에 대한 연구는 국내에서 미비한 실정이다. 반면에 온도차 발전에 적용될 수 있는 열교환기 및 해양구조물 등의 제작기술은 높은 수준을 보유하고 있으므로, 추가적인 연구개발을 통하여 최적배치를 통한 발전 효율의 향상 및 경제성의 제고를 추구해 나가는 것이 필요하다. 또한 해양온도차 발전에 대하여 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있지만 상용화를 위한 실증실험 단계까지 이르지 못하고 있어, 국내 실용화 뿐 아니라 해양플랜트 수출과 해외자원개발을 위한 원천기술 확보 및 대규모 실증실험이 필요한 상황이다.

본 연구는 기존의 개방형 해양온도차발전 시스템에 태양열 시스템을 융합하여 기존 해양온도차발전 시스템의 문제점을 극복하고, 전력생산과 해수를 이용한 담수생산을 동시에 할 수 있는 태양열-해양온도차 융·복합 시스템의 성능해석을 시뮬레이션을 통하여 수행하였고, 해양온도차발전 시스템의 터빈출력, 터빈크기, 발전량, 담수량 등을 분석하여 시스템의 장점을 집목한 최적의 태양열-해양온도차 융·복합 시스템을 개발 하였다. 또한 기존 시스템의 효율 발전량 담수생산량 등의 기초 성능 데이터를 이용하여 태양열 이용 해양온도차발전 시스템(SH-OTEC)의 최적의 효율, 발전량, 담수생산량을 파악하기 위해 Fortran과 EES(Engineering Equation Solver) 소프트웨어 ver. 6.8 을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

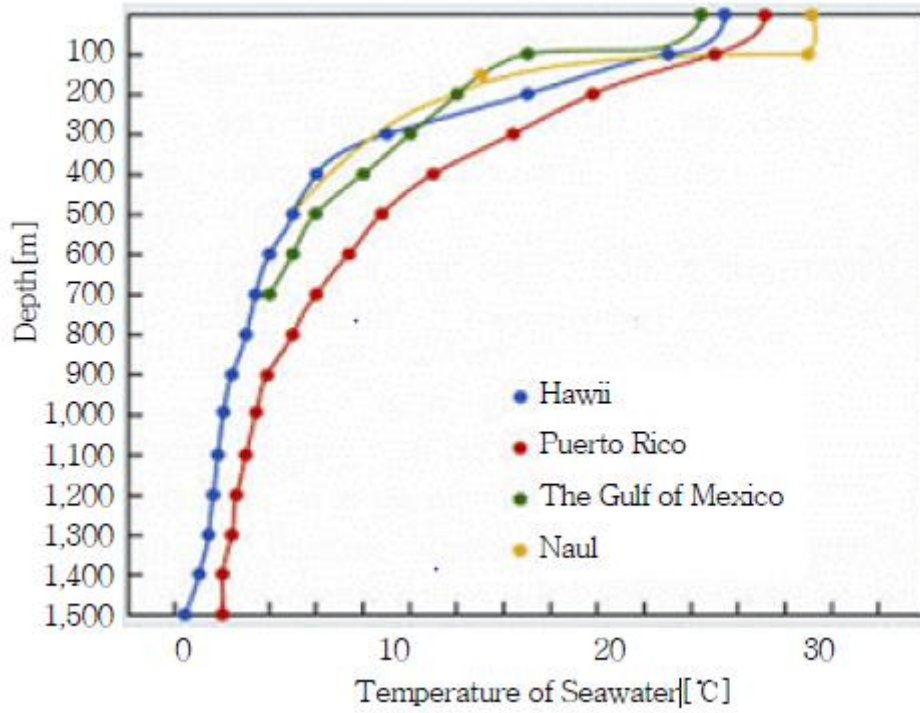


Fig. 1 Vertical temperature distribution of seawater

II. 이론적 배경

1. 해양온도차발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)

해양에너지를 이용하는 방법 중의 하나인 해양온도차발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC)은 태양으로부터 지구의 바다로 흡수되는 에너지를 이용하는 시스템으로써, 해수면의 고온의 표층수와 저온의 심층수의 온도차를 이용하여 전기를 생산하는 온도차 발전시스템으로 해양에서 온도 변화는 표층수의 온도가 20 ~ 30℃, 심층수의 온도가 3 ~ 10℃ 정도의 온도로 약 10 ~ 25℃의 온도차가 있다. 해수의 고온과 저온의 작은 온도 차이 때문에 OTEC의 효율도 제한된다. 이러한 OTEC 시스템의 성능을 향상을 위해서 태양열, 공장 폐열 등의 보조 열원을 이용하여 시스템의 효율을 증가시키고자 하는 연구가 수행되고 있다. 이와 함께 시스템에 적합한 작동유체의 선택 또한 시스템의 효율을 향상시킬 수 있는 한 방법이다. 해양온도차발전의 낮은 효율을 개선하고 OTEC 발전소의 성능향상을 위해 많은 연구 노력들이 있었다.

그러나 여러 가지 해양온도차발전 시스템 중에서도 개방형 사이클은 냉매를 사용하는 다른 시스템과는 달리 해수자체를 작동유체로 사용하기 때문에 보다 환경 친화적이며, 전력생산과 담수생산을 동시에 할 수 있다. 또한 시스템 운영에 필요한 열을 표층수로부터 얻기 때문에 가화기가 시스템에 포함 되어있어 기존 OTEC 시스템에 비해 열교환기가 차지하는 비중이 줄어든다. 하지만 발전터빈의 입·출구 압력차가 매우 작아 시스템의 효율이 낮으며, 기화기에서 발생한 불응축가스를 제거하기 위해 추가적인 동력이 필요하다는 단점을 가지고 있기 때문에 이와 같은 문제점을 극복하기 위한 연구가 필요하다. 또한 국내의 해양온도차 발전기술은 실험실 수준의 연구에 머물러 있기 때문에 실용화를 위한 핵심 기술 개발이 시급한 상황이다.

1) 폐쇄형 사이클

Fig. 2는 폐쇄형 사이클의 개략도이다. 일반적으로 발전소들은 크게 불 때 보일러, 터빈, 응축기, 펌프라는 4가지의 주요한 장비들로 이루어져 있다. 해양온도차 발전에서는 열을 해양의 표층수로부터 얻기 때문에 보일러 대신 기화기라는 장비에서 표층수와 작동유체 간의 열 교환이 이루어지고, 포화(혹은 과포화, 과열)기체가 된 작동기체는 터빈으로 이동하여 발전기를 작동시킨다. 터빈을 통과한 후 온도가 떨어진 작동유체는 이상(2-phase)상태에 놓이게 되고 응축기로 들어가서 바다 심층수와 열교환을 하고 과냉상태가 된다. 이 후 유체는 펌프로 들어가 압력이 올라가게 되고나서 다시 기화기로 들어가서 사이클을 완성하게 된다.

폐쇄형 사이클에 쓰일 수 있는 냉매에는 NH_3 (암모니아), HCFC(수소염화불화탄소), CFC (프레온가스)등이 있으나, 암모니아는 독성과 가연성, 그리고 심한 냄새가 단점이고, 불화 탄소류는 오존분해물질인 단점이 있다. 그래서 세계 각국에서는 다른 대체 냉매들을 개발 중에 있다.

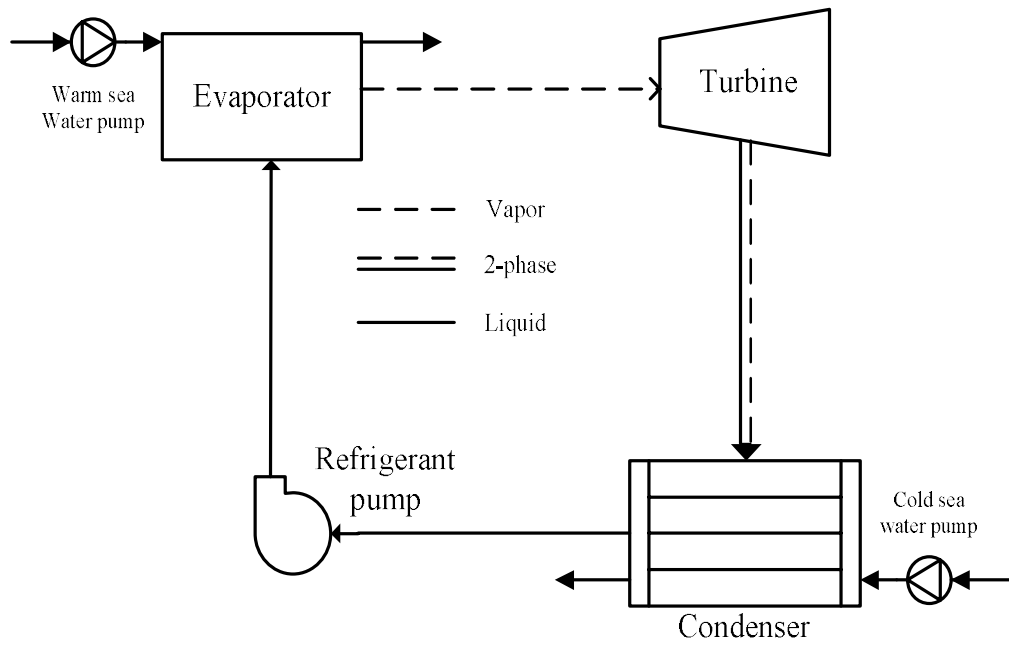


Fig. 2 Schematic diagram of a closed OTEC system.

2) 개방형 사이클

OTEC 시스템의 종류에는 폐쇄형, 개방형, 재생식, 칼리나, 혼합형 등이 있다. 이 중 개방형 OTEC 시스템은 다른 OTEC 시스템과는 달리 해수자체를 작동유체로 사용하기 때문에 기존 OTEC 시스템에 비해 경제 적이며 표층수와 심층수 간의 온도 차의 대부분을 전력생산에 이용할 수 있어 에너지 활용을 극대화시킬 수 있는 장점이 있다. Fig. 3과 같이 개방형 OTEC 시스템은 기화기(flash evaporator), 터빈, 발전기, 응축기로 구성되어 있으며, 작동유체를 순화시킬 필요가 없기 때문에 순환펌프는 구성되지 않는다. 또한 기화기를 사용하는 시스템 특성상 열교환기가 차지하는 비중이 다른 OTEC 시스템보다 작아 시스템의 초기 투자비용을 큰 폭으로 감소시킬 수 있다.

Fig. 3는 개방형 사이클의 개략도이다. 개방형 시스템으로 따뜻한 표층수가 매우 낮은 압력으로 유지되는 기화기로 유입되면, 순간적으로 기화하여 터빈과 발전기를 구동시키고 응축기를 통하여 응축된다. 응축기에서 응축된 물은 담수저장 탱크로 이동하게 된다. 개방형 OTEC 시스템의 경우 해수를 작동유체로 사용하기 때문에 해수 내에 녹아있던 수소, 산소 등의 가스가 기화기 내의 저압으로 인하여 증발과 동시에 불응축가스(non-condensable gas, NCG)가 생성된다. NCG는 시스템의 효율에 악영향을 미치고 운전효율의 급격한 저하를 초래한다. 이러한 불응축가스의 제거를 위해 vacuum pump를 필요로 한다. 만일 이 가스가 응축기내에 쌓이게 되면 응축기 운전효율의 급격한 저하를 초래한다. 불응축 가스를 제거하는데 필요한 동력은 시스템 전체출력의 10% 정도인 것으로 보고되어 있다.

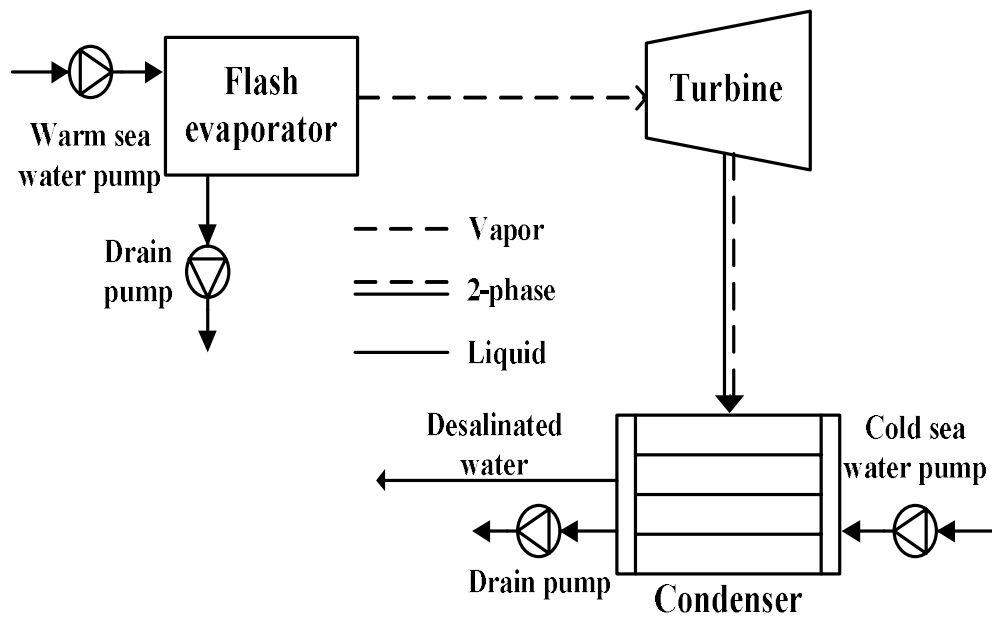


Fig. 3 Schematic diagram of open OTEC system.

3) 재생사이클

Fig. 4는 재생사이클의 개략도이다. 기존의 폐쇄형 사이클과 많이 유사하나, 시스템 내에 Open feed water heater가 추가되어 터빈을 지난 일부 증기가 Open feed water heater를 통과하면서 증발기로 들어가는 작동유체를 미리 가열시키는 것이 다른 점이다. 그래서 기존 폐쇄형에서 Open feed water heater와 펌프 하나가 추가된다.

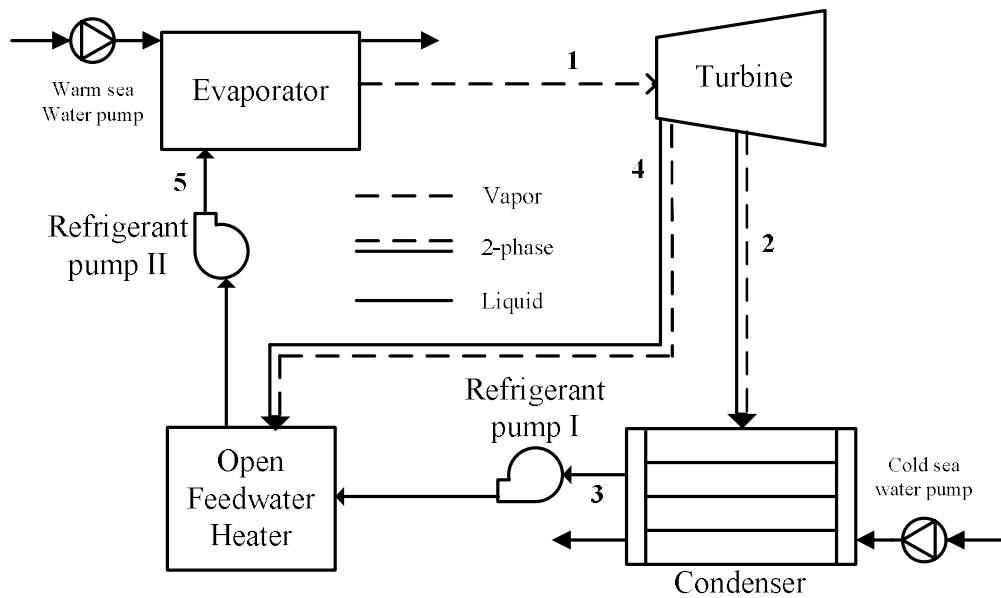


Fig. 4 Schematic diagram of a regenerative system.

4) 칼리나 사이클

칼리나 사이클은 폐쇄형 사이클에서 분류기, 재생기, 팽창밸브, 혼합기가 추가된 시스템으로 칼리나 사이클의 작동원리는 다음과 같다. 재생기 내에서 증발기로 유입되는 작동유체는 물, 암모니아 혼합물이며 이 혼합물은 해수와의 열교환으로 인해 증발하고, 증발기를 지난 증기혼합물은 분류기에서 포화증기, 포화액으로 분리되고 포화증기는 터빈을 가동시킨 후 혼합기로 들어간다. 분류기에서 분리되어진 고온의 포화액은 재생기를 거쳐 증발기로 유입되는 과냉액 상태의 물, 암모니아 혼합물과 열교환 후에 팽창 밸브를 통해 혼합기로 들어가서 터빈에서 나온 포화증기와 섞이게 된다. 혼합기에서 나온 혼합물은 응축기에서 저온의 해수와 열교환을 하게되고 포화액 상태로 변환 후 재생기를 통과, 증발기로 유입된다.

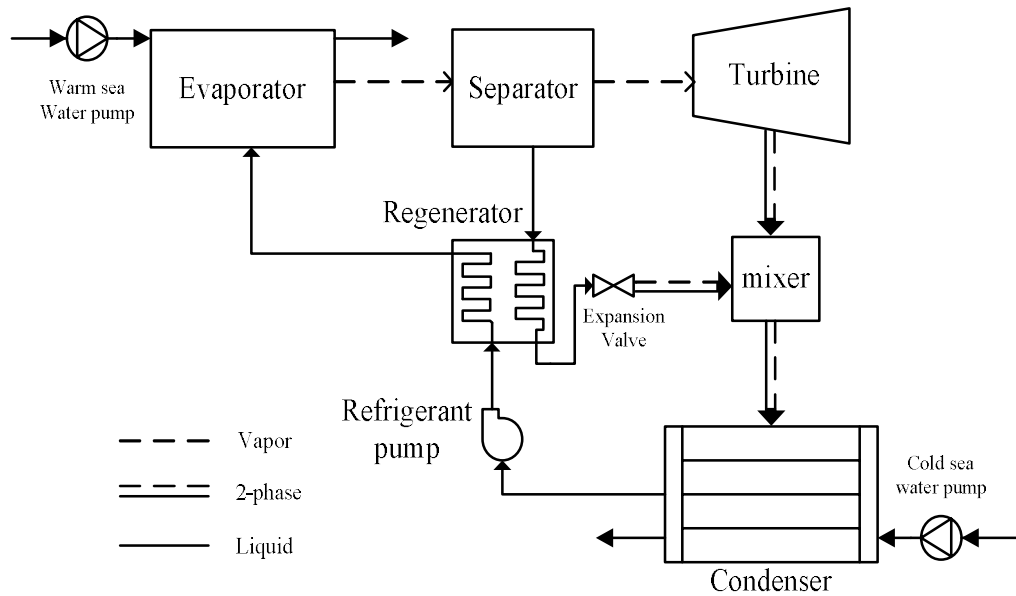


Fig. 5 Schematic diagram of a Kalina system.

5) 혼합형 사이클

혼합형 해양온도차발전 시스템은 개방형과 폐쇄형 해양온도차발전 시스템을 결합한 형태이다. 혼합형 시스템은 개방형 시스템의 담수생산과 폐쇄형의 높은 효율을 동시에 취하기 위하여 만들어졌다. 개방형 시스템과 똑같이 담수를 생산할 수 있으며, 동시에 폐쇄형 시스템에 근접한 효율을 가진다. 혼합형 시스템은 Integrated 혼합형 시스템과 Joint 혼합형 시스템으로 구분할 수 있으며, 두 시스템의 차이점은 증발기의 위치이다. Uehara et al.은 이 두 가지 시스템 중 효율이 더 높은 것은 Integrated 혼합형 시스템이라고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 Integrated 혼합형 시스템을 채택하여 연구를 수행 하였다.

Fig. 6과 같이 Integrated 혼합형 시스템은 폐쇄형 시스템과 개방형 시스템을 연결해놓은 듯한 모습이다. 작동유체가 증발기에서 표층수와 열교환 과정을 거친 후 기화기로 들어가 증발한 후 응축기에서 유입되는 심층수와 열교환을 하면서 액체 상태로 변하고, 담수 저장 탱크로 향하게 되는 것이 특징이다. 혼합형 시스템도 개방형 시스템과 마찬가지로 불응축가스를 제거하는 데에 동력이 소모되며, 이 동력은 전체출력의 약 2.8% 정도로 알려져 있다.

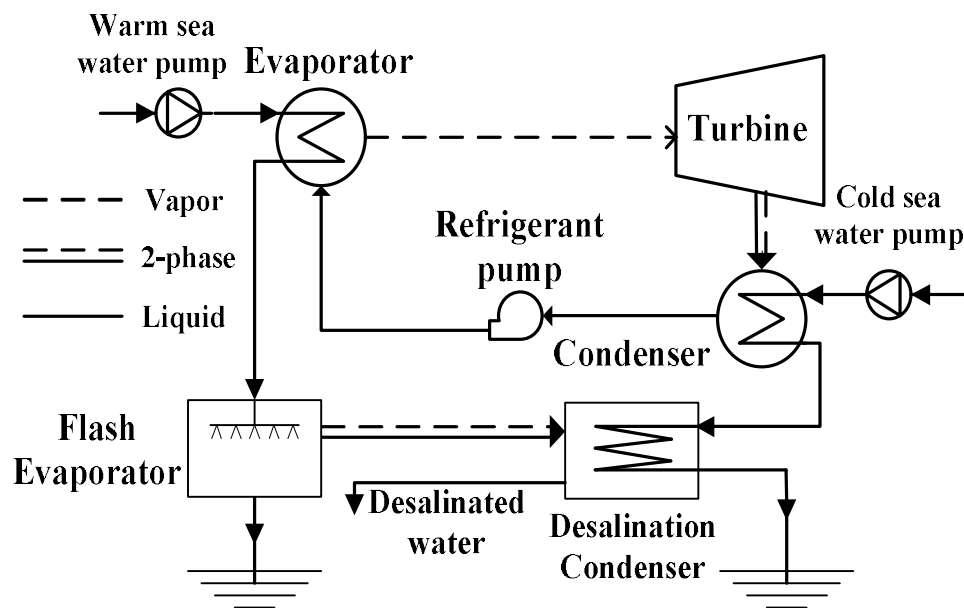


Fig. 6 Schematic diagram of diagram of a hybrid system

2. 태양열-OTEC 복합 시스템

1) 태양열-개방형 OTEC 시스템

Fig. 7은 본 연구에서 제안한 태양열-개방형 OTEC 시스템의 개략도이다. 기존시스템은 태양열 집열기, 축열조, 순환펌프, 기화기, 터빈, 발전기, 응축기로 구성되어 있다. 기존 개방형 시스템과는 다르게 태양열 집열기에 의해 가열된 작동 유체는 축열조로 이동하여 기화기 내에서 해수와 열교환을 한 뒤 순환펌프에 의해 다시 태양열 집열기로 이동하게 된다. 기화기 내로 유입되는 해수는 축열조 유체와의 열교환을 통하여 바로 증발하게 되며, 증발된 증기는 터빈을 작동시켜 발전한 후 응축기로 이동하여 담수화 처리된다. 이와 같은 태양열-개방형 OTEC 시스템은 전력과 담수생산을 동시에 할 수 있으며, 발전터빈의 입·출구 압력차가 매우 작아 다른 OTEC 시스템보다 낮은 효율을 가지고 있는 기존 개방형 OTEC 시스템의 단점을 보완할 수 있다.

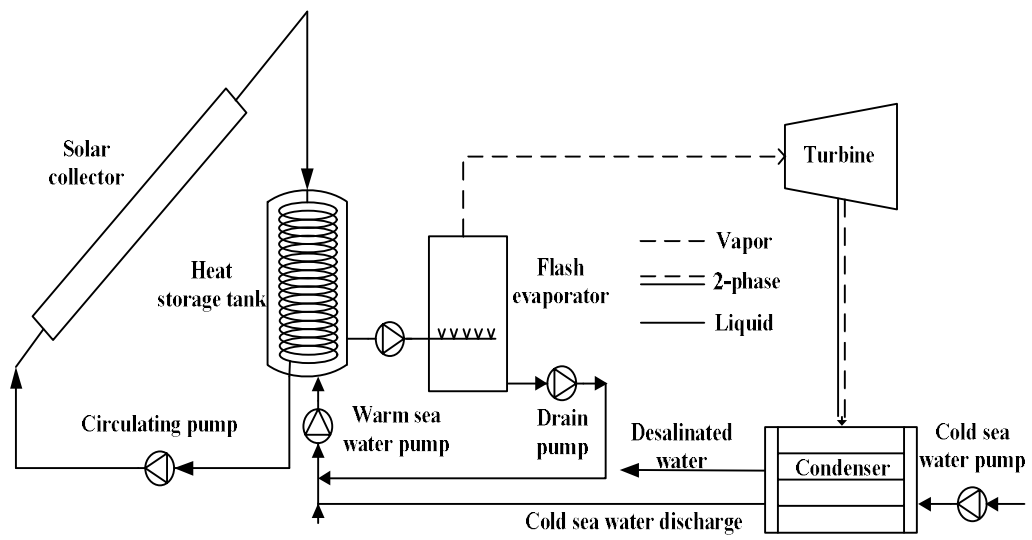


Fig. 7 Schematic diagram of solar-open OTEC system.

2) 태양열-혼합형 OTEC 시스템

Fig. 8은 본 연구에서 제안한 태양열-혼합형 OTEC 시스템의 개략도이다. 시스템은 태양열 집열기, 축열조, 순환펌프, 기화기, 증발기, 냉매펌프, 터빈, 발전기, 응축기로 구성되어 있다. 태양열 집열기에 의하여 가열된 작동유체는 태양열-개방형 OTEC 시스템과 마찬가지로 축열조로 이동하게 되고, 증발기 내에서 냉매와 열교환을 한 뒤 기화기로 이동하게 된다. 기화기로 이동된 유체는 기화기 내로 유입되는 해수와 열교환을 한 후 순환펌프에 의해 다시 태양열 집열기로 이동하게 된다. 증발기 내의 냉매는 터빈과 발전기를 구동시켜 전력을 생산한 후 응축기에서 응축된 뒤 냉매펌프에 의하여 다시 증발기로 이동하게 된다. 냉매를 응축시키기 위해 응축기로 유입된 차가운 해수(심층수)는 담수화 응축기로 이동하게 되며, 기화기에 의해 증발된 증기는 담수화 응축기 내에서 차가운 해수와 열교환을 하여 최종적으로 담수화 처리된다. 이와 같은 태양열-혼합형 OTEC 시스템은 개방형과 폐쇄형 해양온도차발전 시스템을 결합하여 담수생산과 효율향상을 동시에 취하기 위해 만들어진 혼합형 OTEC 시스템의 장점을 더욱 높일 수 있다.

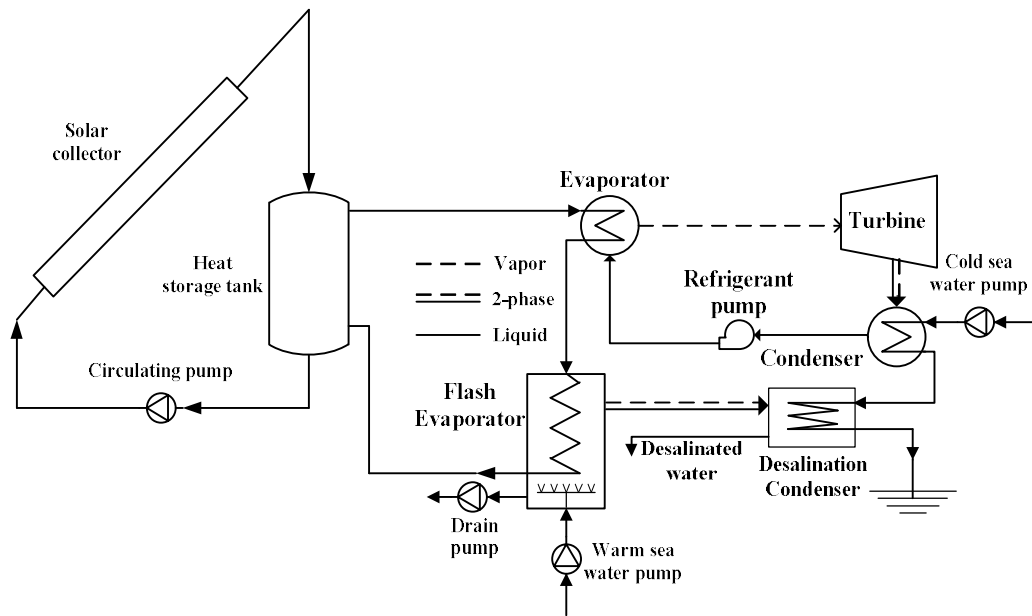


Fig. 8 Schematic diagram of solar-hybrid OTEC system.

III 시스템 해석방법

1. 시스템 모델링

본 연구에서는 각 시스템에 대한 성능을 동일한 조건에서 비교분석하기 위하여 기화기의 증발용량을 150kW로 일정하다고 가정하였다. 다양한 사이클간의 성능 비교를 위해서는 모든 유체에 대하여 증발용량이 일정하다고 가정하는 것이 이상적이며 이것은 증발기로 유입되는 공급수의 질량유량과 온도의 값을 고정시킴으로써 가능하다. 그리고 기화기의 총괄열전달계수와 전열면적의 곱인 UA, 기화기와 응축기에서의 공급해수 질량유량, 터빈 효율, 기화기 유입 유체온도, 심층수 온도를 표 2와 같은 조건에서 모사하였으며, 태양열을 이용하는 태양열-개방형 OTEC 시스템의 경우 기화기 유체온도를 60 - 80℃, 기화기 압력을 2.5 - 40 kPa로 태양열-혼합형 OTEC 시스템의 경우에는 증발기 내에서 냉매와 열교환하는 유체온도를 60 - 80℃로 변화시키면서 시스템을 성능을 계산하였다. 또한 작동유체마다 증발잠열이 다르기 때문에 터빈의 체적유량은 변하는 것으로 가정하였으며, 각각의 시스템을 해석하는데 있어 터빈의 등엔트로피 효율은 90%, 등엔트로피 펌프 효율은 85%로 동일하게 적용하였으며, 실제 OTEC 시스템에서는 터빈 출구의 액적 상태에 따라 터빈 블레이드 손상이 발생하므로 이를 막기 위하여 터빈 출구 이상 조건의 건도한계가 있다.

Table 1. System operating conditions.

기본	표층수 입구온도 (°C)	28	
	표층수 출구온도 (°C)	25	
	심층수 입구온도 (°C)	4	
	증발기의 LMTD (°C)	2.5	
	응축기의 LMTD (°C)	2.5	
	등엔트로피 터빈효율 (%)	90	
	등엔트로피 펌프효율 (%)	85	
	증발기 및 기화기의 증발용량 (kW)	150	
	표층수의 질량유량 (kg/s)	11.96	
	심층수의 질량유량 (kg/s)	11.72	
	기화기 효율	0.85	
	기화기 압력 (kPa)	2.5	
	기존 개방형 OTEC 시스템	표층수 질량유량 (kg/s)	6.16
		심층수 질량유량 (kg/s)	5.98
태양열-개방형 OTEC 시스템	기화기 유체온도 (°C)	60, 65, 70, 75, 80	
	기화기 압력 (kPa)	2.5, 5, 10, 15, 25, 30, 35, 40	
태양열-혼합형 OTEC 시스템	증발기 유입 유체온도 (°C)	60, 65, 70, 75, 80	

OTEC 시스템의 성능을 정확하게 해석하고 계산하기 위하여 기화기와 응축기에 적절한 열전달 방정식을 적용하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 기화기와 응축기의 열전달 효율을 대수평균온도차(Log Mean Temperature Difference, LMTD)로 정의 하였다. 증발용량이 일정하다고 가정하였으므로 UA는 상수가 되며, 해석의 단순성을 위하여 압력강하는 무시하였다. 시스템의 열전달 해석을 위하여 기화기는 과냉영역, 2상영역, 과열영역의 세 부분으로 나누었으며, 응축기는 과냉영역과 2상영역의 두 부분으로 나누어 계산하였다. UA 값과 LMTD 값을 정의한 경우 유체사이의 열교환은 식 (1), (2), (3), (4)로 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

여기서 하첨자, e , c , sub , sup , tp 는 각각 증발기, 응축기, 과냉도, 과열도, 2상을 나타내며, f 는 열교환기 전체의 열량에 대한 과냉, 2상 그리고 과열부분의 열량비를 나타낸다.

1) 기화기 (Fresh evaporator)

Fig. 9와 같은 기화기는 여러 가지 OTEC 시스템 중에서도 개방형과 혼합형 OTEC 시스템에만 사용되는 중요한 요소이다. 기화기는 해수를 기화시키는 메커니즘에 따라 open channel flow, falling films, falling jets, vertical spouts 등으로 분류할 수 있으며, 본 연구에서는 모든 메커니즘에 적용할 수 있는 가장 일반적인 방법을 사용하여 기화기를 모델링 하였다. 앞서 언급하였듯이 시스템 성능 비교를 위해 증발기 용량을 150kW로 일정하게 가정 하였으며 이러한 증발기 용량에 대해서 기화기에 공급되는 표층수의 질량 유량은 식 (5)를 이용하여 얻을 수 있다. 여기서 m_{ev} 는 기화기로 공급되는 해수의 질량유량, Q 는 기화기에서 담수 생산에 필요한 열량을 나타낸다. 또한 기존 OTEC 시스템은 2 - 3%의 효율로 운영이 되며. 이는 증발기로 유입되는 97 - 98% 정도의 열이 응축기를 통해 빠져나가는 것을 나타낸다. 따라서 심층수의 질량유량을 표층수의 질량유량의 98%로 가정하였다.

$$m_{ev} = Q / (C_p \times \Delta T) \quad (5)$$

그리고 기화기에서 적용한 에너지 방정식은 식 (6), (7)과 같이 정의할 수 있으며, 이를 정리하면 기화기 내에서 증발하는 수증기의 양 \dot{m}_2 를 도출할 수 있다. 이렇게 생성된 수증기의 양은 식 (8)을 이용하여 기화기에서 생성된 증기의 질량 곧 시스템에서 생산되는 담수량을 나타낸다.

$$m_1 h_1 = m_2 h_2 + m_3 h_3 \quad (6)$$

$$m_1 = m_2 + m_3 \quad (7)$$

$$m_2 = \frac{m_1 C_p (T_1 - T_3)}{h_{fg} - C_p (T_3 - T_e)} \quad (8)$$

또한 기화기에서 증기생성에 필요한 열량과 포화 증기의 엔탈피 그리고 기화기의 효율 등은 식(9), (10), (11)을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$Q_{evap} = m_2 \cdot (h_2 - h_3) \quad (9)$$

$$h_2 = C_p \cdot t_e + h_{fg} \quad (10)$$

$$\eta_{evap} = \frac{t_1 - t_3}{t_1 - t_e} \quad (11)$$

여기서 m_1 , m_2 , m_3 는 기화기로 유입되는 공급해수의 질량, 생성된 증기의 질량, 바다로 방출되는 해수의 질량을 T_1 , T_2 , T_3 는 각 해수의 온도, t_e 는 기화기 내에서의 공급해수 포화온도, h_{fg} 는 증발잠열을 나타낸다.

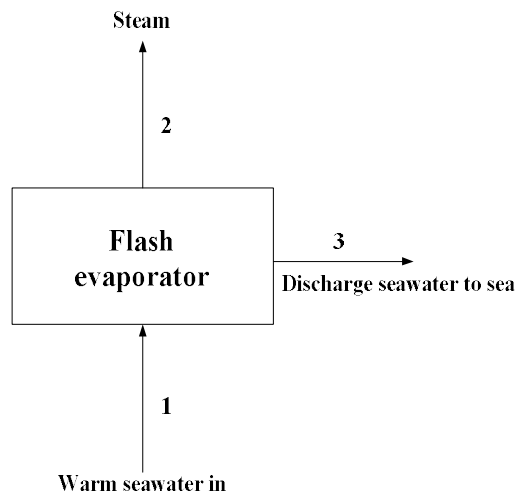


Fig. 9 Conceptual diagram of flash evaporator

본 연구에서는 개방형과 혼합형 OTEC 시스템의 효율을 기화기에서 발생하는 불응축가스를 제거하기 위한 동력을 고려하여 시스템 효율 η_{sys} 로 정의하였으며, 시스템 효율을 구하기 위한 계산식은 다음과 같다.

$$\eta_{sys} = (\dot{W}_T - \dot{W}_{p, NCG} / \dot{Q}_{evap}) \quad (12)$$

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_T - \dot{W}_{P_{total}} \quad (13)$$

$$\dot{W}_{P_{total}} = \dot{W}_{wp} + \dot{W}_{cp} + \dot{W}_{p, NCG} \quad (14)$$

$$\dot{W}_{p, NCG} = 0.1 \cdot \dot{W}_T \quad (15)$$

여기서 \dot{Q}_{evap} , \dot{W}_{net} , \dot{W}_T , $\dot{W}_{P_{total}}$, \dot{W}_{wp} , \dot{W}_{cp} , $\dot{W}_{p, NCG}$ 는 각각 기화기 증발열량, net power, 터빈동력, 전체 펌프동력, 표층수 공급 펌프동력, 표층수 공급 펌프동력, 제거동력, 불응축가스 제거동력을 나타낸다.

본 연구에서는 이와 같은 방법으로 기존 개방형 OTEC 시스템과 태양열-개방형/혼합형 OTEC 시스템의 효율, 발전량, 담수생산량을 기화기에 유입되는 해수의 온도와 포화온도차, 기화기 압력에 따라 비교분석하였다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

1. 태양열-개방형 OTEC 시스템 성능 분석 결과

1) 공급온도와 포화온도차에 따른 시스템 성능비교

Fig. 10은 Table. 1의 주어진 조건을 이용하여 기존 개방형 OTEC 사이클의 T-s 선도를 나타낸 그래프이다. 개방형 OTEC 시스템으로 공급되는 표층수의 온도는 28℃이며 내부 압력이 2.5 kPa인 기화기로 공급이 된다. 기화기 내부 압력은 진공수준의 상태로 기화기 내의 포화온도인 21.08℃에서 공급해수가 순간 증발하며 생성된 증기는 터빈으로 이동 후 터빈을 작동시키고 통과한 작동기체는 응축기로 이동하여 저온의 심층수와 열교환 후 담수화 처리된다. 기존 개방형 OTEC 사이클의 시스템 효율은 3.01%으로 발전량은 5.01 kW, 생산되는 담수량은 3.71 L/min으로 계산되었다.

Fig. 11은 태양열-개방형 OTEC 시스템의 기화기에 공급되는 해수의 온도를 60, 65, 70, 75, 80℃로 증가시키고 각 공급온도의 포화온도차를 5, 10, 15℃로 하여 시스템의 출력을 비교하여 나타낸 그래프이다. 기화기로 공급되는 해수의 온도와 각 공급수의 포화온도차가 증가할수록 시스템의 출력은 온도차에 비례하여 증가함을 확인할 수 있고 특히, 공급 해수온도 80℃, 기화기 내부 압력 25.04 kPa, 포화온도차 15℃에서의 시스템 출력은 약 50.2 kW로 기존 개방형 OTEC 시스템보다 약 10배정도 증가된 출력을 나타내는 것을 확인하였다. 이는 공급되는 해수의 포화온도 감소에 따라 기화기에서 생산되는 증기의 양이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

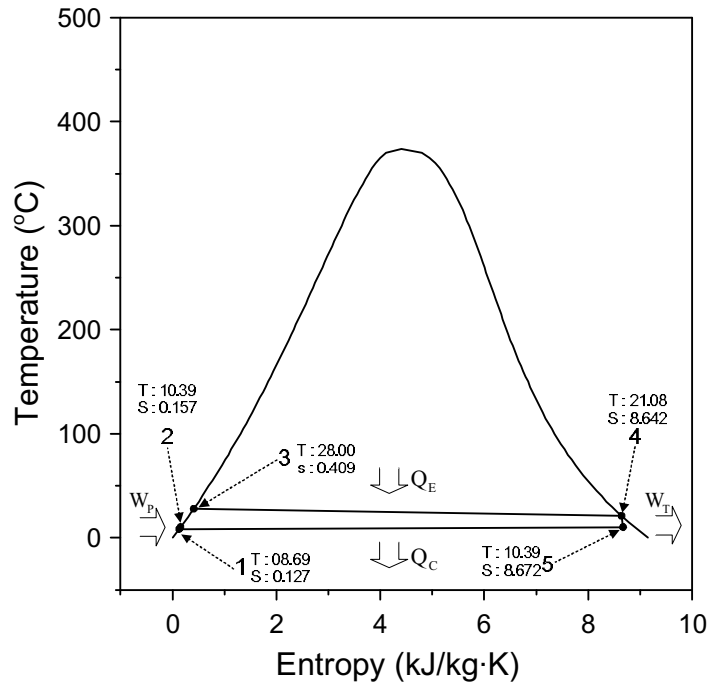


Fig. 10 diagram of base open OTEC system

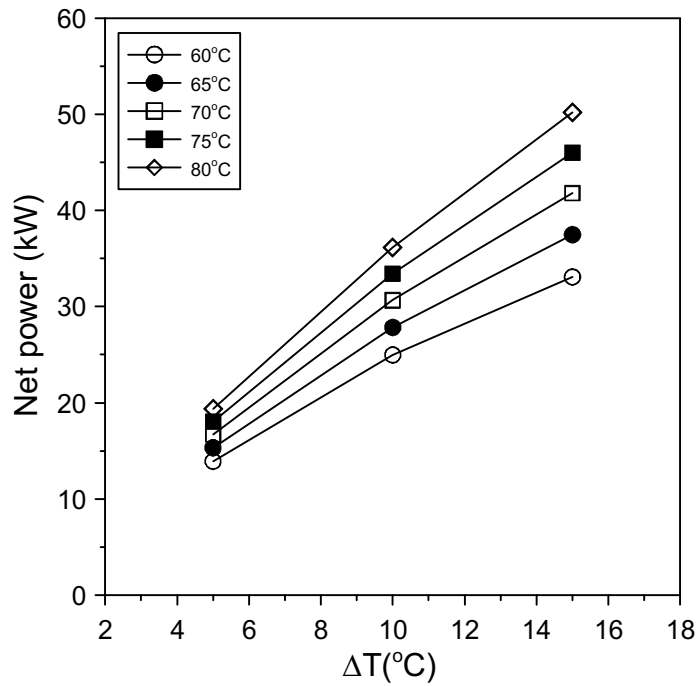


Fig. 11 Solar-open OTEC system netpower for saturation temperature difference

Fig. 12은 태양열-개방형 OTEC 시스템의 기화기에 공급되는 해수의 온도를 60, 65, 70, 75, 80℃로 증가 시키고 각 공급되는 해수의 포화온도차를 5, 10, 15℃로 하여 각각의 시스템의 효율을 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 공급수의 포화온도차가 증가할수록 태양열-개방형 OTEC 시스템의 효율은 감소함을 알 수 있다. 이와 같이 시스템 효율이 감소하는 이유는 공급해수와 포화온도차가 증가할수록 기화기에서 담수생산에 필요한 열량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

태양열-개방형 OTEC의 기화기 압력 38.6kPa, 해수의 공급온도 80℃, 공급해수와 포화온도차 5℃일 때 시스템에서 생산되는 담수량은 2.84 L/min, 발전량 19.4kW이다. 이 때 태양열-개방형 OTEC 시스템의 효율은 16.06%로 공급온도, 기화기압 모든 조건 중 가장 높은 효율을 나타냈으며 기존 개방형 OTEC 시스템의 효율보다 약 5배 높음을 알 수 있다.

Fig. 13은 태양열-개방형 OTEC 시스템의 기화기 공급해수의 유체온도와 포화온도차에 따른 시스템에서 생산된 담수량을 비교하여 나타낸 그래프이다. 공급해수의 온도와 포화온도차가 증가할수록 기화기를 통해 생산되는 담수량은 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 기화기로 공급되는 해수의 포화온도차가 증가함에 따라 기화기에서 생산되는 증기의 양이 증가하여 태양열-개방형 OTEC 시스템의 출력과 담수 생산량이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 포화온도차가 동일할 경우에는 기화기로 유입되는 공급해수의 온도 변화는 담수 생산량에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다.

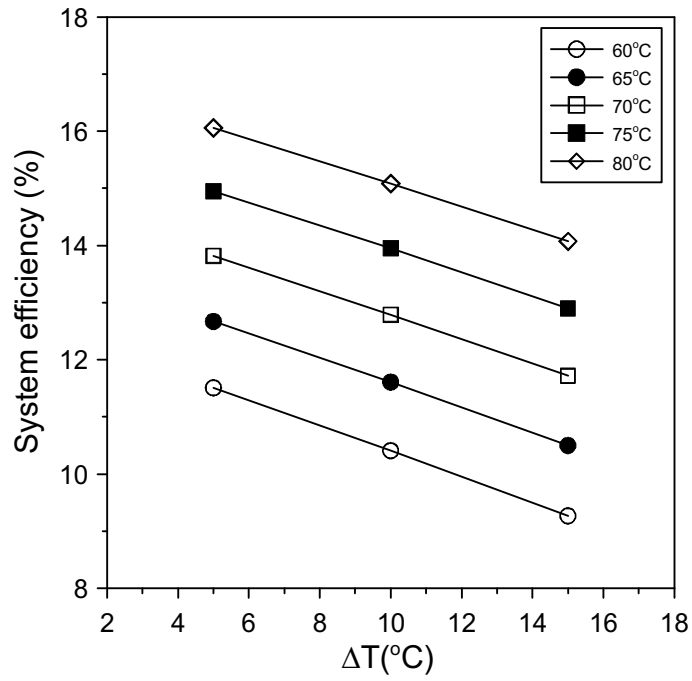


Fig. 12 Solar-open OTEC system efficiency for saturation temperature difference.

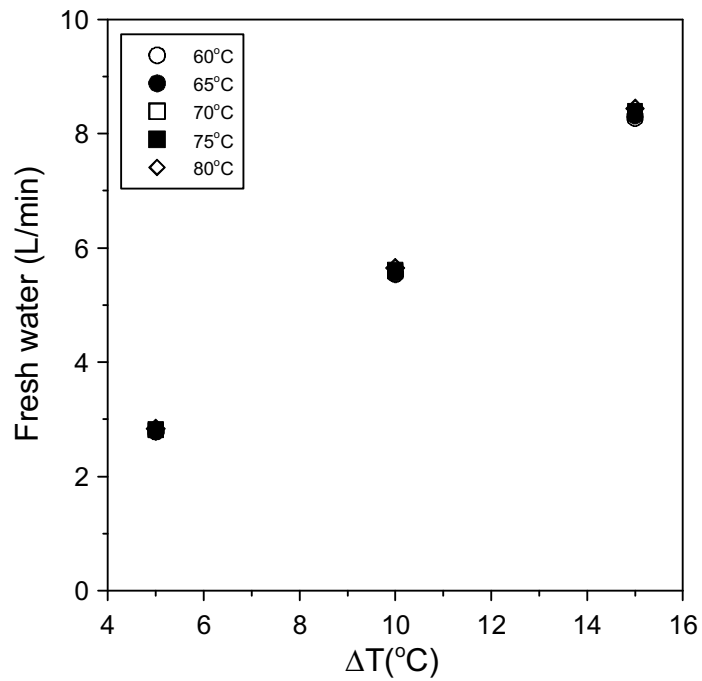


Fig. 13 Solar-open OTEC system Fresh water for saturation temperature difference.

2) 기화기 압력에 따른 성능비교

본 연구에서는 기화기로 공급되는 해수의 온도를 80℃로 일정하게 유지시키고, 기화기 내부의 압력을 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 kPa로 증가하여 변화시킨 후 태양열-개방형 OTEC 시스템의 발전량, 효율, 담수생산량 등의 성능을 기존 개방형 OTEC 시스템의 성능과 비교분석하였다.

Fig. 14는 태양열-개방형 OTEC 시스템의 기화기 압력이 2.5 - 40 kPa으로 증가함에 따라 변화하는 출력을 기존 개방형 OTEC 시스템의 출력과 비교하여 나타낸 그래프이다. 태양열-개방형 OTEC 시스템의 출력은 기화기 압력이 2.5 kPa에서 10 kPa까지 증가하다가 10 kPa을 기점으로 다시 감소하였으며, 출력이 가장 높은 기화기 압력은 10 kPa로 기존 개방형 OTEC 시스템의 출력보다 약 15배 높음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 기화기 내에서 증발하는 수증기의 양 m_2 와 터빈 입·출구 엔탈피의 차가 기화기 압력에 따라 달라지기 때문인 것으로 판단되며, 기화기 압력 10 kPa일 때, m_2 와 터빈 입·출구 엔탈피의 차가 최적인 것임을 나타낸다.

Fig. 15는 기존 개방형 OTEC 시스템과 태양열-개방형 OTEC 시스템의 기화기 압력 변화에 따른 시스템 효율을 비교하여 나타낸 그래프이다. 기화기 압력이 증가할수록 시스템 효율이 크게 증가함을 확인할 수 있으며, 이와 같은 실험 결과는 기존의 개방형 OTEC 시스템을 이용할 때보다 태양열-개방형 OTEC 시스템을 이용할 경우에 시스템의 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있다는 것을 나타낸다. 또한 기화기 압력이 40 kPa일 때 16.22%의 시스템 효율을 나타내었으며, 이는 기존 OTEC 시스템보다 약 5.4배 높은 효율임을 확인하였다.

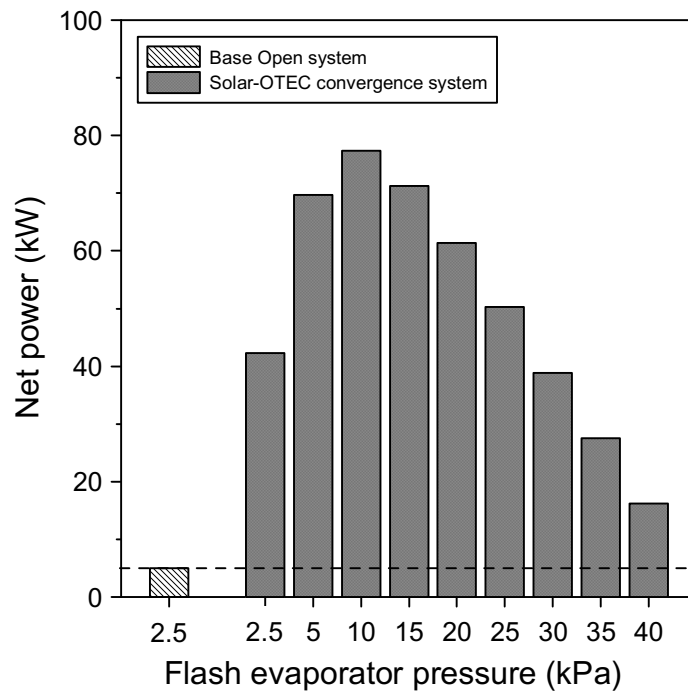


Fig. 14 Comparison of the Net power as a function of the flash evaporator pressure

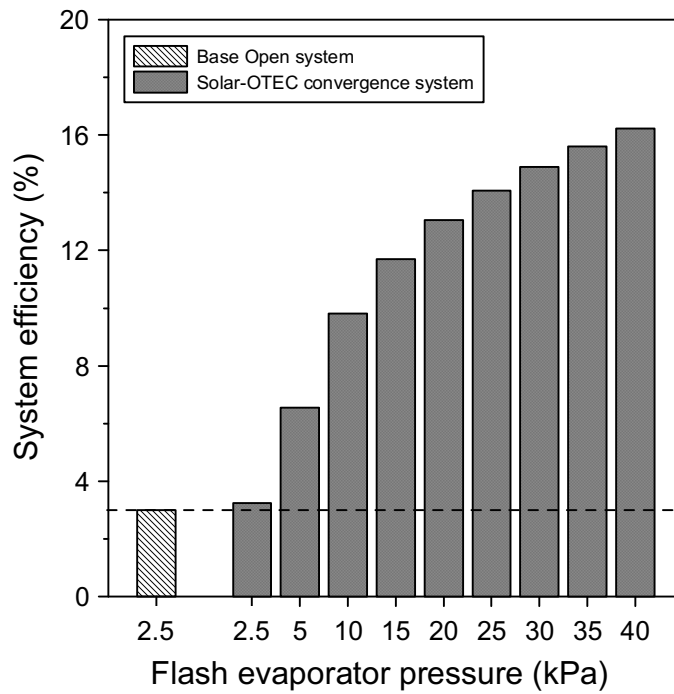


Fig. 15 Comparison of the system efficiency as a function of the flash evaporator pressure

Fig. 16은 태양열-개방형 OTEC 시스템에서 생산되는 담수량을 기화기 압력에 따라 나타내고, 기존 개방형 OTEC 시스템의 담수생산량과 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 태양열-개방형 OTEC 시스템의 담수생산량은 기화기 압력이 상승할수록 감소한다는 것을 알 수 있으며, 이는 기화기 압력이 높아질수록 유체의 포화온도차가 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 생산되는 담수량은 기화기 압력 2.5 kPa에서 가장 높음을 보이고 있으며, 이 때의 담수생산량은 32.05 L/min으로 기존 개방형 OTEC 시스템의 담수생산량인 3.72 L/min보다 약 8.6배 높음을 알 수 있었다.

Fig. 17은 기존 개방형 OTEC 시스템 대비 태양열-개방형 OTEC 시스템의 효율, 출력, 담수생산량 증가율을 기화기 압력에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 앞서 설명하였듯이 증가되는 효율과 출력, 담수생산량은 각각 기화기 압력 40, 10, 2.5 kPa에서 가장 높음을 나타내었다. 하지만 OTEC 시스템의 성능을 나타내는 3가지 중요 요소들의 증가율 곡선을 서로 비교했을 때 담수생산량 증가율 곡선은 기화기 압력이 증가할수록 감소하고 있으나 시스템 효율 증가율 곡선은 기화기 압력 10 kPa을 기점으로 완만해지고 있으며, 이는 효율이 증가되는 정도가 기화기 압력이 증가함에 따라 점점 줄어든다는 것을 나타낸다. 시스템 출력 증가율 또한 기화기 압력 10 kPa을 기점으로 40 kPa까지 감소함을 나타내고 있다. 따라서 시스템 효율, 출력, 담수생산량을 고려했을 때 10 kPa의 기화기 압력에서 시스템이 최적의 성능을 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다.

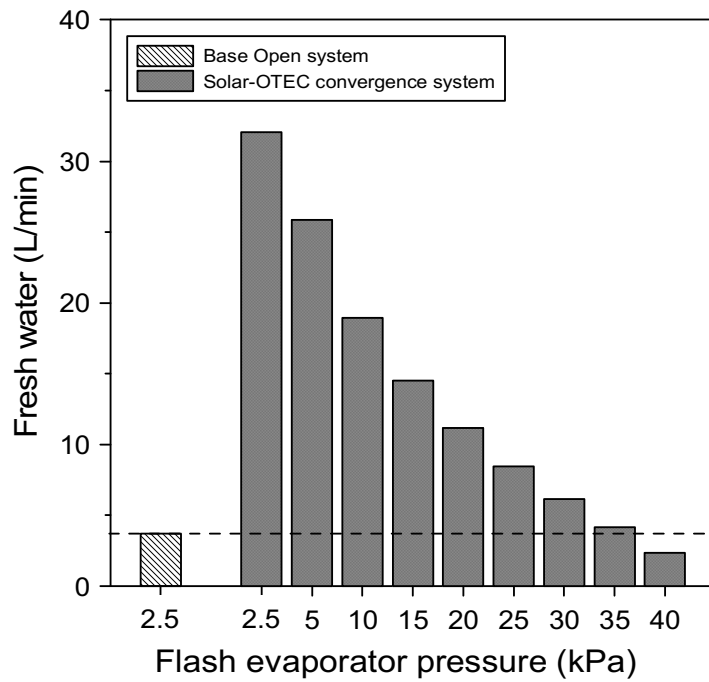


Fig. 16 Comparison of the fresh water production as a function of the flash evaporator pressure.

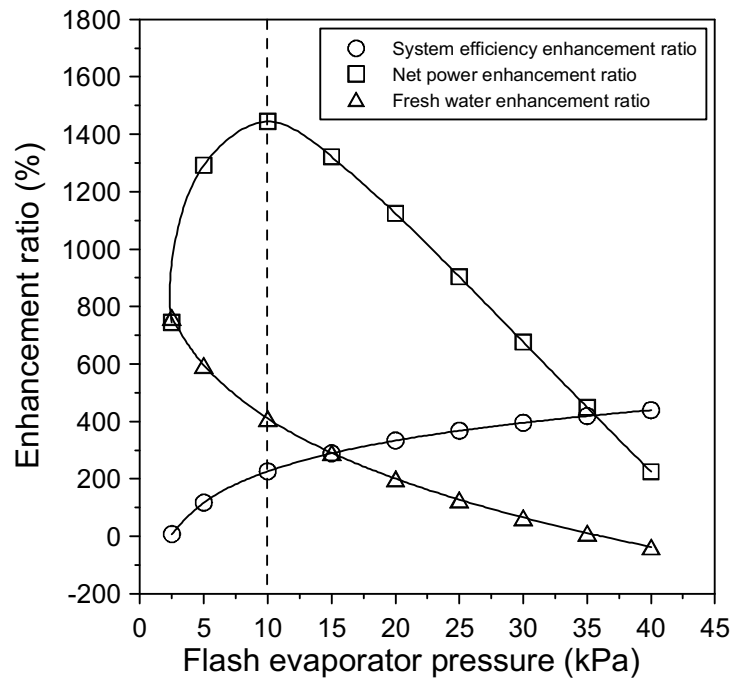


Fig. 17 System efficiency netpower and fresh water enhancement ratio as a function of the flash evaporator pressure

2 태양열-혼합형 OTEC 시스템 성능 분석 결과

1) 작동유체에 따른 성능비교

Fig. 18은 가장 좋은 시스템 효율을 얻을 수 있는 R134a 냉매를 사용한 기존 혼합형 OTEC 시스템의 T-s선도를 나타낸 그래프이다. 28 °C의 해수의 표층수가 증발기 내에서 비등점이 낮은 냉매 R134a와 열교환을 하여 냉매를 증발시키고, 증발된 냉매는 터빈과 발전기를 작동시켜 응축기에서 응축된 후 냉매순환펌프에 의해 다시 증발기로 이동하게 된다.

Fig. 19과 20은 Table 1.의 기본조건을 이용한 기존 혼합형 OTEC 시스템의 작동유체별 출력과 담수생산량을 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 시스템 출력은 R134a 냉매에서 가장 높게 나타났으며, 담수생산량은 모든 작동유체에서 동일하게 4.08 L/min임을 확인할 수 있었다. 모든 작동유체에서 담수생산량이 동일한 이유는 모든 냉매에 동일한 질량 유량이 유입되어 28 °C의 해수가 증발기 내에서 냉매와 동일하게 열교환을 한 후 같은 온도로 기화기 내로 유입되었기 때문이라고 판단된다. 그리고 담수생산량이 기존 개방형 OTEC 시스템보다 높은 것은 기존 혼합형 OTEC 시스템의 표층수 질량유량이 11.96 kg/s로 기존 개방형 OTEC 시스템의 질량유량 6.16 kg/s 보다 높기 때문인 것으로 분석된다.

Fig. 21은 Table. 1의 기본조건을 이용하여 기존 혼합형 OTEC 시스템에 적용할 수 있는 작동유체들을 냉매로 사용하여 시스템의 효율을 비교하여 나타낸 그래프이다. 태양열-혼합형 OTEC 시스템의 냉매로 R134a를 사용하였을 때 가장 높은 시스템 효율을 얻을 수 있으며, 이 때의 효율은 약 3.65%임을 확인할 수 있었다. 또한 R410a 냉매를 사용했을 때 기존의 혼합형 OTEC 시스템의 시스템 효율이 가장 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 태양열-혼합형 OTEC 시스템의 작동유체를 가장 효율이 좋은 R134a 냉매로 선정하여 모든 연

구를 수행하였다.

Fig. 22는 R22 냉매를 기준으로 한 각 작동유체간의 상대적 터빈 크기를 비교한 것이다. 터빈의 크기는 터빈 입구와 출구의 엔탈피 차를 터빈으로 유입되는 작동유체의 비체적으로 나눈 값으로 정의되며, 비체적이 증가할수록 터빈의 크기도 비례하여 증가한다. R22의 터빈 크기를 1.0이라고 하였을 때, R32, R410a, R125, R143a 순으로 터빈의 크기가 증가하였으며, 이와 같은 냉매를 사용하면 많은 연구자들이 제안한 R22와 R717을 사용하는 경우 보다 터빈 크기가 작아짐을 알 수 있다.

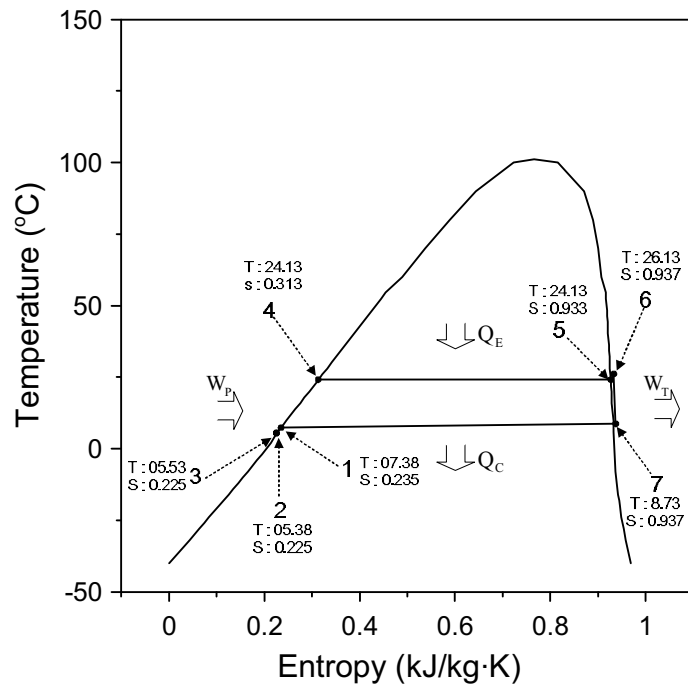


Fig. 18 diagram of base hybrid OTEC system (R134a)

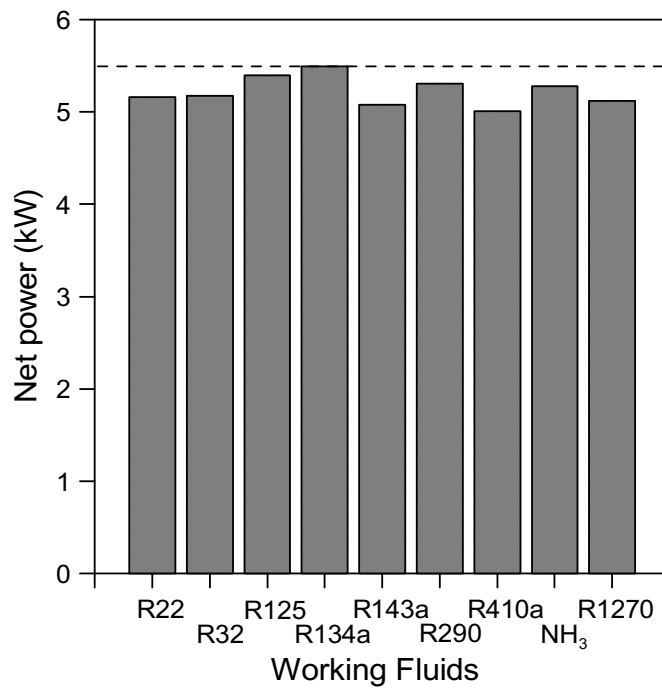


Fig. 19 Base hybrid OTEC system's Net power using various working fluids.

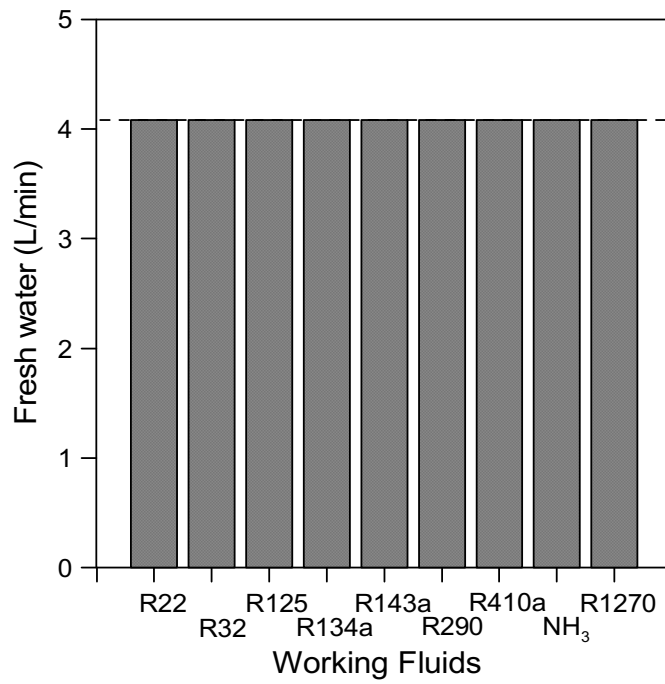


Fig. 20 Comparison of fresh water production with various working fluids..

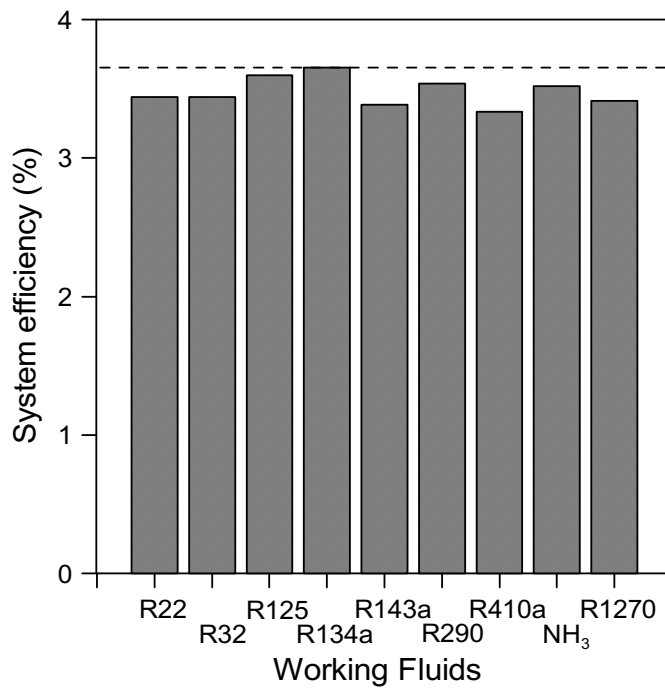


Fig. 21 Base hybrid OTEC system's efficiency using various working fluids.

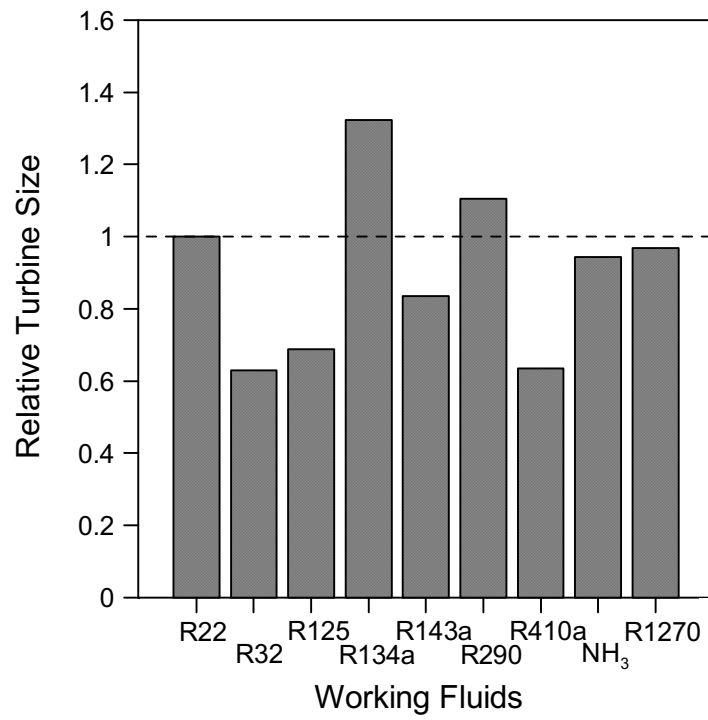


Fig. 22 Comparison of relative turbine sizes with various working fluids.

2) 공급온도에 따른 성능비교

Fig. 23는 태양열-혼합형 OTEC 시스템의 작동유체를 R134a, 증발기 유입 유체온도를 60, 65, 70, 75, 80℃로 하여 각각의 유체온도에 대한 시스템의 출력을 기존 혼합형 OTEC 시스템의 효율과 비교하여 나타낸 그래프이다. 앞서 설명한 태양열-혼합형 OTEC 시스템의 효율 그래프와 마찬가지로 증발기 유입 유체온도가 증가할수록 시스템의 출력은 이와 비례하여 증가함을 알 수 있고, 60, 65, 70, 75, 80 ℃에서의 출력은 각각 14.90, 16.00, 17.10, 18.09, 19.97 kW 임을 확인하였으며, 80 ℃에서의 출력은 기존 혼합형 OTEC 시스템보다 약 3.5배 높음을 알 수 있었다.

Fig. 24는 태양열-혼합형 OTEC 시스템의 작동유체를 R134a, 증발기 유입 유체온도를 60, 65, 70, 75, 80 ℃로 하여 각각의 유체온도에 대한 시스템 효율을 기존 혼합형 OTEC 시스템의 효율과 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 증발기 유입 유체온도가 증가할수록 시스템 효율은 이와 비례하여 증가함을 확인할 수 있으며, 80℃에서의 효율은 약 12.65%로 기존 혼합형 OTEC 시스템보다 약 3.5배 높음을 알 수 있었다.

Fig. 25는 증발기 공급해수 유체온도에 따른 태양열-혼합형 OTEC 시스템의 담수생산량을 기존 혼합형 OTEC 시스템과 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 공급되는 해수의 온도가 증가할수록 담수생산량은 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 담수생산량이 가장 높은 80 ℃에서는 59.01 L/min의 담수가 생산됨을 알 수 있었다. 이와 같은 담수량을 하루를 기준으로 ton으로 환산했을 시 약 3.54 ton/day로 하루에 최대 3.5 ton의 담수를 생산할 수 있음을 알 수 있었다.

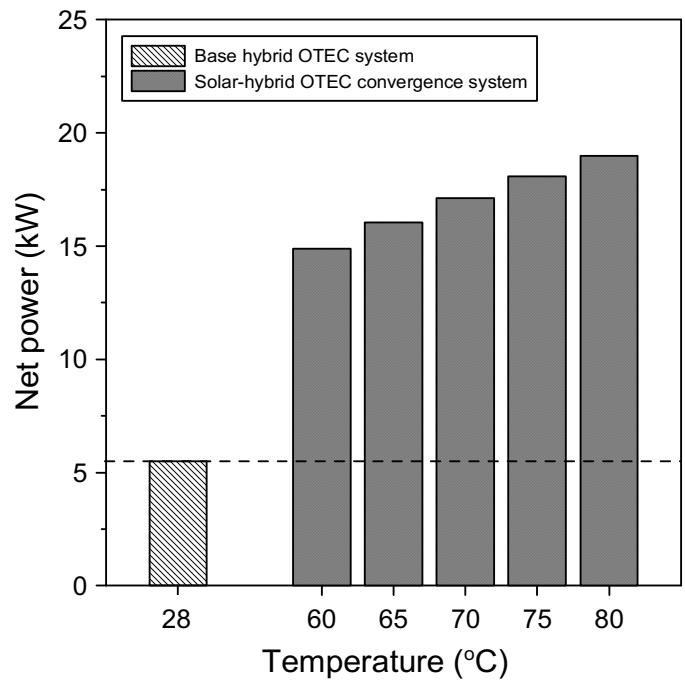


Fig. 23 Net power for warm sea water inlet temperature

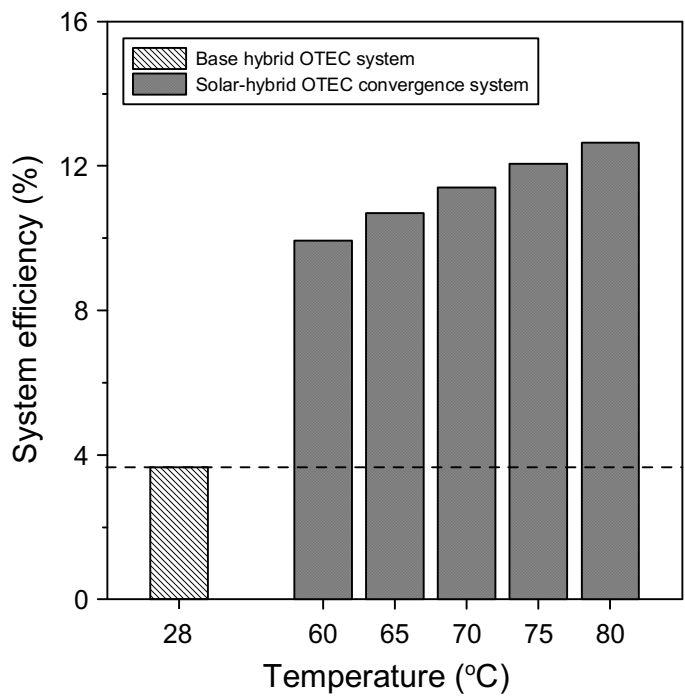


Fig. 24 System efficiency for warm sea water inlet temperature

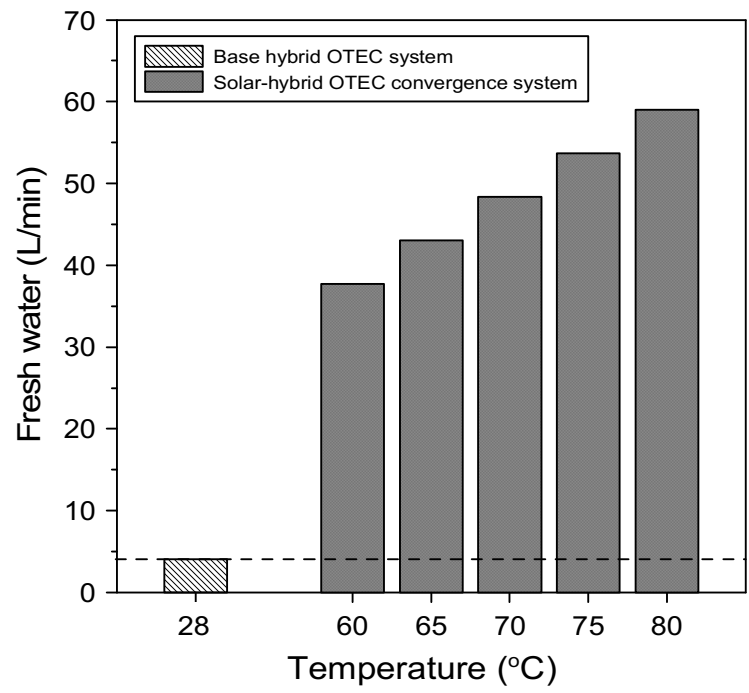


Fig. 25 Fresh water for warm sea water inlet temperature

3 태양열-OTEC 시스템 태양열 집열기 면적 산정

태양열-OTEC 시스템의 집열 면적 산정은 시스템의 기화기에서의 증기 생산에 필요한 가열열량을 이용하여 시스템에 필요한 태양열 집열면적을 산정 할 수 있다. 따. 태양열 집열 면적을 산정하기 위해서는 일반적으로 태양열 집열기의 효율을 계산하는 식을 이용하며 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{Q}{A \times I} \quad (17)$$

식(17)에서 Q 는 태양열 집열기를 통해 얻은 열량, A 는 태양열 집열 면적, I 는 일사량, η 는 태양열 집열기의 효율을 나타낸다. 위 식의 Q 는 시스템의 기화기에서 증기 생산에 필요한 열량을 나타낼 수 있으며 식

$$Q = \dot{m}_2 \times \text{Latent Heat Of Vaporization} \quad (18)$$

식(18)에서 \dot{m}_2 는 기화기를 통해 생산되는 해수의 증발량, Latent Heat Of Vaporization은 기화기 내부압력 2.5 kPa에서의 증발잠열로 2451 kJ/kg으로 나타낼 수 있다.

본 연구에 사용된 태양열 - 개방형 OTEC은 공급 해수 온도 80°C, 기화기압 2.5kPa일 때 담수 생산량은 32.05 L/min으로 하루 최대 담수 생산량은 46 ton/day로 나타났다. 이에 따라 시스템에서 담수 생산에 필요한 공급해수 가열열량은 약 1309 kW로 분석되었으며 일평균 일사량 700 W/m², 집열기 효율 50%로 가정할 경우 태양열 - 혼합형 OTEC 시스템을 구축하기 위해 필요한 집열면적은 약 3,741 m²가 필요한 것으로 분석되었다. 태양열 - 혼합형 OTEC 시스템의 경우 공급 해수온도 80°C, 기화기압 2.5 kPa일 때 59.01 L/min로 하루 최대 담수 생산

량은 85 ton/day으로 담수를 생산하기 위해 필요한 공급해수 가열열량은 약 2411 kW로 분석되었으며 태양열 - 혼합형 OTEC 시스템을 구축하기 위해 필요한 집열면적은 약 6,887 m²가 필요한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 기존 OTEC 시스템의 문제점을 극복하기 위하여 기존의 개방형 OTEC 시스템과 태양에너지를 이용하는 태양열 시스템을 접목하여 태양열-OTEC 복합시스템을 개발하였고, 시스템의 성능과 설계기준을 파악하기 위하여 전산해석 연구를 수행하였다. 그 결과 태양열-개방형/혼합형 OTEC 시스템의 유입유체 및 작동유체 온도, 포화온도, 기화기 압력 등에 따른 시스템 효율과 발전량, 담수생산량을 비교분석하였으며, 이와 같은 결과를 토대로 최적의 온도 및 압력, 작동유체 등을 도출하였다

또한 전력과 담수를 동시에 생산할 수 있는 고효율 태양열-해양온도차 시스템의 개발로 환경친화적인 OTEC 시스템의 상용화를 촉진시킬 수 있으며, 태양에너지 이용의 활성화를 기대할 수 있다. 그리고 석유 및 석탄과 같은 화석연료를 대체하여 CO₂의 저감은 물론 깨끗한 청정에너지원으로서 태양 및 해양 에너지원의 이용을 극대화시켜 상당한 경제적 및 사회적 파급효과를 가져올 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 결과는 향후 산업용, 건물용, 수송용 등 산업 전 분야의 열교환 시스템에 응용할 수 있다. 특히, 냉장고, 라디에이터(radiator), cooler, heater, 순간온수기, 공조설비를 비롯한 각종 대형 발전소의 보일러 및 열교환기, 에너지 산업, 석유화학, 화학공업, 제철산업과 같은 산업에 다양하게 응용할 수 있을 것으로 판단된다. 이 외의 본 연구개발 결과의 활용방안은 다음과 같다.

V. 결론

본 연구에서는 시스템의 기화기로 공급되는 해수의 유체온도와 포화온도차, 기화기 압력, 작동유체 등의 변화에 따른 태양열 개발형/혼합형 OTEC 시스템의 성능을 기존 개방형/혼합형 OTEC 시스템과 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존 개방형 OTEC 시스템과 태양열-개방형 OTEC 시스템의 시스템 효율과 출력을 기화기 압력 변화에 따라 비교한 결과 태양열-개방형 OTEC 시스템의 기화기로 공급되는 해수온도 80 °C, 기화기 압력 10 kPa일 때 담수생산량 18.94 L/min, 효율 9.8%, 출력 77.4 kW로 태양열-개방형 OTEC 시스템의 모든 조건 중 가장 높은 출력이 계산되었고 기존 개방형 OTEC 시스템의 출력 5kW 보다 약 15.5배 이상 증가하였다

(2) 태양열-개방형 OTEC 시스템의 기화기로 공급되는 해수온도 80°C, 기화기 압력 40 kPa일 때 시스템에서 생산되는 담수량 2.35 L/min, 발전량 16.26 kW, 시스템 효율 16.22%로 태양열-개방형 OTEC시스템의 모든 조건 중 가장 높은 효율이 나타났으며 기존 개방형 OTEC 시스템의 효율 3%보다 약 5.4배 상승하였다.

(3) 태양열-개방형 OTEC 시스템의 담수생산량은 공급해수의 온도 80°C 기화기 압력 2.5 kPa일 때 시스템 출력 42.3 kW, 효율 3.5%, 담수생산량 32.05 L/min으로 기존 개방형 OTEC 시스템의 담수생산량인 3.72 L/min보다 약 8.6배 증가하였다.

(4) 기존 개방형 OTEC 시스템과 태양열-개방형 OTEC 시스템을 비교한 결과 출력과 효율, 담수생산량은 각각 기화기 압력 10, 40, 2.5 kPa에서 기존 개방형 OTEC 시스템보다 각각 15.5배, 5.3배, 8.6배 증가했다. 태양열-개방형 OTEC 시스템의 3가지 중요 요소들을 서로 비교했을 때 담수생산량은 기화기 압력 상승에 따라 감소하였으나 시스템 효율과 출력은 기화기압 10 kPa을 기점으로 40

kPa까지 감소함을 나타내고 있다. 따라서 시스템 효율, 출력, 담수생산량을 고려했을 때 10 kPa의 기화기 압력에서 시스템이 최적의 성능을 나타낸다는 것을 확인할 수 있었다.

(5) 기존 혼합형 OTEC 시스템의 작동유체별 출력, 효율, 담수생산량을 분석한 결과 시스템 출력, 효율은 R134a 냉매에서 가장 높게 나타났으며, 담수생산량은 모든 작동유체에서 담수생산량이 동일한 이유는 모든 냉매에 동일한 질량 유량이 유입되어 28℃의 해수가 증발기 내에서 냉매와 동일하게 열교환을 한 후 같은 온도로 기화기 내로 유입되었기 때문이라고 분석 되었다

(6) 기존 혼합형 OTEC 시스템과 태양열-혼합형 OTEC 시스템의 시스템 출력을 해수 공급온도 변화에 따라 비교한 결과 시스템의 기화기로 공급되는 해수온도가 80℃일 때 19.5 kW로 기존 혼합형 OTEC 시스템의 출력인 5.3 kW 보다 약 3.6배 증가한 것으로 분석 되었다.

7) 태양열-혼합형 OTEC 시스템과 기존 혼합형 OTEC 시스템을 증발기 공급 해수 온도에 따라 비교한 결과 공급되는 해수의 온도 증가에 따라 담수생산량은 비례하여 증가하였고 공급수의 온도가 80 ℃일 때 59.01 L/min의 담수가 생산되었다. 이에 따라 일일 84 ton/day의 담수를 생산할 수 있다.

(8) 본 연구에 사용된 태양열 - 개방형 OTEC은 공급 해수 온도 80℃, 기화기 압 2.5 kPa일 때 담수 생산량은 32.05 L/min으로 하루 최대 담수 생산량은 46 ton/day로 나타났다. 이에 따라 시스템에서 담수 생산에 필요한 공급해수 가열열량은 약 1309 kW로 분석되었으며 일평균 일사량 700 W/m², 집열기 효율 50%로 가정할 경우 태양열 - 혼합형 OTEC 시스템을 구축하기 위해 필요한 집열면적은 약 3,741m²가 필요한 것으로 분석되었다. 태양열 - 혼합형 OTEC 시스템의 경우 공급 해수온도 80℃, 기화기압 2.5 kPa일 때 59.01 L/min로 하루 최대 담수 생산량은 85 ton/day으로 담수를 생산하기 위해 필요한 공급해수 가열열량은 약 2411 kW로 분석되었으며 태양열 - 혼합형 OTEC 시스템을 구축하기 위해 필요한 집열면적은 약 6,887 m²가 필요한 것으로 나타났다.

참고문헌

A. d'Arsonval, Utilisation de forces naturelles, Revue Scientifique, 17 (1881) 370-372..

Uehara, H., Kusuda, H., Monde, M., Nakaoka, T., Ocean thermal energy conversion plant with Freon 22, Proceeding, Sixth OTEC Conference, 6 (1979).

Nakaoka, T., Uehara, H., Performance test of a shell-and-tube plate type evaporator for OTEC. Exp. Therm. Fluid Sci. 1 (1988a) 283 - 291.

Nakaoka, T., Uehara, H., 1988b. Performance test of a shell-and-tube plate type condenser for OTEC. Exp. Therm. Fluid Sci. 1 (1988b) 275 - 281.

Owens, W.L., Optimization of closed-cycle OTEC plants, ASME - JSME Thermal Engineering Joint Conference, 2 (1980) 227 - 239.

Uehara, H., Ikegami, Y., Optimization of a closed-cycle OTEC system. J. Solar Energy Eng. 112(4) (1990) 247 - 256.

Uehara, H., Ikegami, Y., Parametric performance analysis of OTEC using Kalina cycle, ASME joint solar engineering conference, (1993) 203 - 207.

Uehara, U., Ikegami, Y., and Nishida, T., Performance Analysis of OTEC System Using a Cycle with Absorption and Extraction Processes, Journal of The JSME, 64(624) (1998) 384 - 389.

Rabas, T.J., Panchal, C.B., Stevens, H.C., 1990. Integration and optimization of the gas removal system for hybrid-cycle OTEC power plants. *J. Solar Energy Eng.* 112 (1990) 19 - 28.

Tseng, C.H., Kao, K.Y., Yang, J.C., Optimal design of a pilot OTEC power plant in Taiwan. *J. Energy Resour. Technol.* 113 (1991) 294 - 299.

Abraham, R., Jayashankar, V., Ikegami, Y., Mitsumori, M., Uehara, H., Analysis of power cycle for 1 MW floating OTEC plant, Proceedings of International OTEC/DOWA, Imari, Japan (1999) 123 - 131.

Kazim, A., Hydrogen production through an ocean thermal energy conversion system operating at an optimum temperature drop, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 2236 - 2246.

Uehara, H., Miyara, A., Ikegami, Y., Nakaoka, T., Performance analysis of an OTEC plant and a desalination plant using an integrated hybrid cycle. *J. Solar Energy Eng.* 118 (1996) 115 - 122.

Ikegami, Y., Sasakib, H., Goudab, T., Uehara, H., Experimental study on a spray flash desalination, *Desalination* 194 (2006) 81 - 89.

M. Faizal and M. R. Ahmed, On the Ocean Heat Budget and Ocean Thermal Energy Conversion. *International Journal of Energy Research*, 35, 1119-1144 (2011).

J. Vadus, A Strategy for OTEC Commercialization, Processing of the 1997 International OTEC/DOWA Association, (1997) 235-247.

Korea Power Company, A Study on the Development of Ocean Thermal Energy Conversion and Wave Power Generation System, Technical report, KRC-89G-T10, (1991).

N. J. Kim, C. N. Kim, W. G. Chun, Using the Condenser Effluent from a Nuclear Power Plant for Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC), International Communications in Heat and Mass Transfer , 30 (2009), 1008-1013.

N. J. Kim, S. H. Shin, W. G. Chun, A Study on the Thermodynamic Cycle of OTEC system, Journal of the Korean Solar Energy Society, 26 (2) (2006) 9-18.

T. Penny, D. Bharathan, J. Althof, B. Parsons, Open-Cycle Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Research: Progress Summary and a Design Study, ASME Paper, 84-WA/Sol-26, (1984).

C. B. Panchal, K. J. Bell, Simultaneous Production of Desalinated Water and Power using a Hybrid - Cycle OTEC Plant, Transaction of the ASME, 109 (1987) 156-160.

B. J. Ryu, Study on gas Hydrate, KIGAM Annual Report, (1997) 24-26.

S. H. Shin, D. S. Jung, C. B. Kim, T. B. Seo, Analysis of a simple Rankine Cycle and Regenerative Rankine Cycle for OTEC Application, Proceedings of the International OTEC/DOWA Conference, 1999, pp. 142-151.

감사의 글

졸업을 앞두고 그동안 감사했던 분들과 함께했던 지난 시간을 떠올리며 감사의 글을 적습니다.

먼저 부족한 저임에도 불구하고 많은 지도와 조언을 아낌없이 주시며, 항상 학생들을 생각해 주시고 이끌어 주시는 김남진 지도교수님, 정말 감사드립니다. 그리고 석사학위논문심사에서 심사와 조언으로 큰 도움을 주신 심사위원장 이윤준 교수님과 심사위원 박성식 선배님 감사드립니다. 아울러 학부생부터 대학원생까지 많은 가르침을 주신 이현주 교수님, 박재우 교수님, 천원기 교수님, 최수석 교수님, 이연건 교수님 모두 감사드립니다.

그리고 졸업을 하시고도 저에게 많은 도움을 주시고, 석사학위논문심사에서 심사와 조언으로 많은 도움을 주신 박성식 선배님과 같은 실험실 후배는 아니지만 많은 조언을 주신 김영민 선배님 감사합니다. 대학원 생활하면서 도움을 주신 에너지공학과 장영준, 박경호, 모용현, 원우연 선배님과 학사때부터 석사를 졸업하는 지금까지 함께 해 온 양종근, 김원식 친구들과 박연현, 정혜준 오정환 후배님 그리고 대전 생활에 많은 도움을 주시고 챙겨주신 서향민, 강길범, 이경수 선배님 그리고 학사생활에 많은 도움을 주고 이끌어준 강윤영 선배님 김우중 선배님 허준, 강지현 친구들과 김성대, 정기홍, 고아름 후배님, 남은 석사 기간동안 많은 도움을 주고 때론 친구처럼 도움을 준 김영훈 후배님 마지막으로 “에너지환경기술연구실” 김동민, 심다민, 정원혁, 송명주, 김지우, 문지은, 강혜원 후배님들 모두 감사드립니다. 끝으로 못난 아들 병수발, 뒷바라지 해주시면서 마음고생이 많았을 저의 아버지, 어머니 두분의 기도로 다시 살아났음을 정말 감사드리고 못난 오빠를 둔 두 여동생 아끼고 사랑하고 너무 고맙고 제 주위 모든 분들이 저에게 힘이 되고 의지가 되었던 것 같습니다. 늘 언제나 감사함을 느끼며 지금까지 배운 것들 모두 잊지 않고 좋은 선배, 좋은 후배의 모습으로 더욱 성장하겠습니다. 일일이 거론하지 못해 죄송하지만 저에게 도움을 주신 모든 분들 정말 감사드립니다.

감사의 글

석사과정 2년이 금세 지난 것 같습니다. 졸업을 앞두고 있는 시점에서 그동안의 시간을 떠올리며 감사의 글을 적습니다.

먼저 부족한 저임에도 불구하고 많은 지도와 조언을 아낌없이 주시며, 항상 학생들을 생각해 주시고 이끌어 주시는 김남진 지도교수님, 정말 감사드립니다. 그리고 석사학위논문심사에서 심사와 조언으로 큰 도움을 주신 심사위원장 이윤준 교수님과 심사위원 이연건 교수님께도 감사드립니다. 아울러 학부생부터 대학원생까지 많은 가르침을 주신 이현주 교수님, 박재우 교수님, 천원기 교수님, 최수석 교수님 모두 감사드립니다.

그리고 부족하고 실수가 많았던 저에게 많은 지식과 도움을 주시고, 때로는 친한 형처럼 때로는 엄한 선배처럼 저를 이끌어준 박성식 선배님과 비록 같은과 후배는 아니지만 같은과 후배처럼 챙겨주시고 많은 조언을 주신 김용환 선배님 감사합니다. 대학원 생활하면서 도움을 주신 에너지공학과 이보안, 장영준, 김영민 선배님과 이바로, 원우연 친구들과 양종근, 김덕우, 김원식, 김승현, 오정민, 이영규, 최동재, 박연현, 정해준, 오정환 후배님, 또한 타지에서도 응원해주신 김민기, 서향민, 홍재별, 강경욱, 강길범, 이경수 선배님, 강윤영 친구, 김성대, 임서연, 정기홍 후배님, 마지막으로 선배인 저를 믿고 따라준 “에너지환경기술연구실” 양용우, 김영훈, 강지용, 이재정, 강상종, 김동민, 심다민, 정원혁, 고아름, 송명주, 허순정, 김효석, 김지우, 문지은, 강혜원 후배님들, 연구실 일로 수고하시는 김은지 선생님 모두 감사드립니다.

끝으로 못난 아들 뒷바라지 해주시면서 항상 잘되라고 응원해주시는 어머니, 철없는 오빠 도와주느라 고생한 착한 동생, 그리고 방황하던 저를 잡아주고 지금까지도 힘이 되는 하늘에 계신 아버지께도 고마움을 표하고 싶습니다.

지금까지 살아오면서 많은 분들이 저에게 힘이 되고 의지가 되었던 것 같습니다. 항상 감사함을 느끼며 지금까지 배운 것들 모두 잊지 않고 좋은 선배, 좋은 후배의 모습으로 더욱 성장하겠습니다. 일일이 거론하지 못해 죄송하지만 저에게 도움을 주신 모든 분들 정말 감사드립니다.