

해양온도차 발전 시스템의 소개



서 태 범

인하대학교 기계공학과
(seotb@inha.ac.kr)

1. 서론

국토의 3면이 바다로 이루어져 있는 우리 나라의 지리적 여건을 고려해 보면 운명적으로 우리 삶은 바다와 깊은 관련을 맺고 있음을 알 수 있다. 따라서, 바다를 얼마나 잘 활용하느냐에 따라 우리 삶은 운택해지고 또한 풍요로워 질 수 있을 것이다. 바다를 활용하는 방법에는 여러 가지가 있겠으나, 그 중에서도 특히 바다가 갖고 있는 천연 에너지의 활용은 필요 에너지의 97% 이상을 수입에 의존하는 우리나라 에너지 수급 실정에서 매우 절실한 문제가 아닐 수 없다.

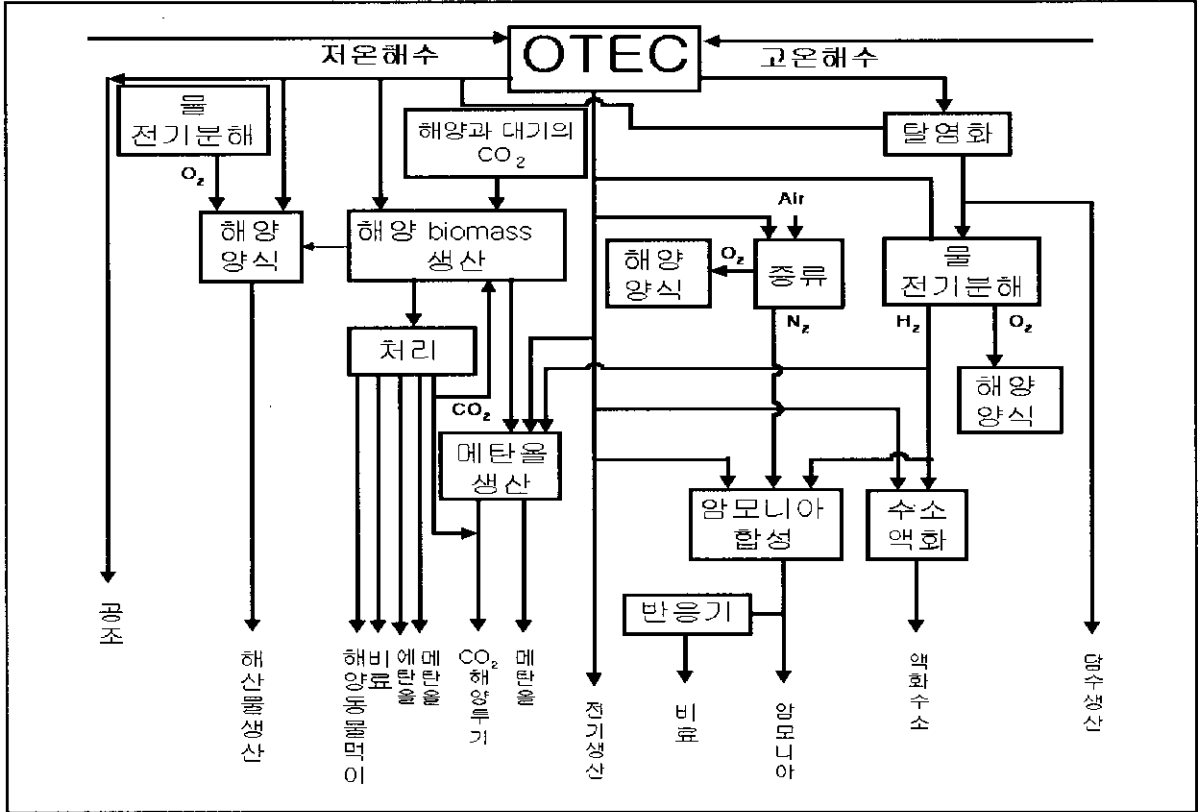
일반적으로 해양이 갖고 있는 천연에너지로는 조력, 파력, 해양온도차, 그리고 해·조류력 등이 있다. 여기서 언급된 해양에너지는 기존의 화석 연료나 원자력 에너지원과는 달리 공해가 전혀 없으며, 또한 그 양이 막대하여 거의 무한대로 사용이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 따라서, 우리나라에서도 이와 같은 에너지의 활용에 대한 관심이 고조되고 있으며, 구체적인 기술 개발 노력이 경주되고 있다. 본 해설에서는 위에서 언급한 해양에너지 중에서 해양 온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) 시스템에 대해서 소개하고자 한다.

2. 해양온도차 발전(OTEC)이란?

바다는 지구 전체 면적의 약 3/4을 차지하고 있기 때문에 지구에 도달하는 태양에너지의 상당량이 바다로 흡수되고 있다. 흡수되는 에너지의 양은 연간 $37 \times 10^{12} \text{kW}$ 에 이르는 것으로 추산되고 있으며, 이는 현재 인류가 필요로 하는 에너지량인 연간 $9.8 \times 10^9 \text{kW}$ 의 4000배에 해당하는 양이 된다.

이러한 에너지의 흡수로 열대와 아열대지방의 해수면의 온도는 약 $24 \sim 28^\circ\text{C}$ 를 유지하게 되나, 해수면으로부터 깊이 700 ~ 1000 m에서는 극지방으로부터의 차가운 해류로 인하여 4°C 정도를 유지되게 된다. 그 결과 표면수와 심해수 사이에 약 $20 \sim 24^\circ\text{C}$ 의 온도차가 발생하게 되며, 이러한 온도차를 이용하여 전력을 생산하는 것이 가능하게 된다. 이것을 해양 온도차 발전(Ocean Thermal Energy Conversion : OTEC)이라고 한다.

OTEC 발전 시스템의 원리는 일반 발전소의 작동 원리와 같다. 그러나 OTEC 발전에서 필요로 하는 것은 단지 심해수와 표면수의 20°C 내외의 온도차로서, 작은 온도차에서 동력을 생산하기 때문에 OTEC 시스템의 효율은 3.5 ~ 4% 정도이나 사용 가능한 전체 전력 전환 효율은 2.5 ~ 3.0%



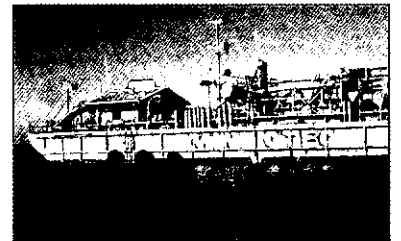
[그림 1] Various applications of OTEC system

에 불과하다. 그러나, 이렇게 낮은 효율에도 불구하고 OTEC은 다음과 같은 이유로 인해 기술적인 관심이 높아지고 있다.

- 1) OTEC은 운전비용이 거의 들지 않는다.
- 2) OTEC 사이클이 저온, 저압이라는 것은 특수재질을 사용하여 고온, 고압으로 작동하는 기존 동력사이클과 비교해 볼 때 요소단가를 줄일 수 있다.
- 4) OTEC은 안전하며 환경 친화

적이다.
5) OTEC 건설에는 설비, 공정, 해양 구조물의 규격이 그대로 적용이 될 수 있고, 건설기간은 원자력 발전소 건설 시 소요되는 6~10년보다 짧은 3~4년 정도이다.

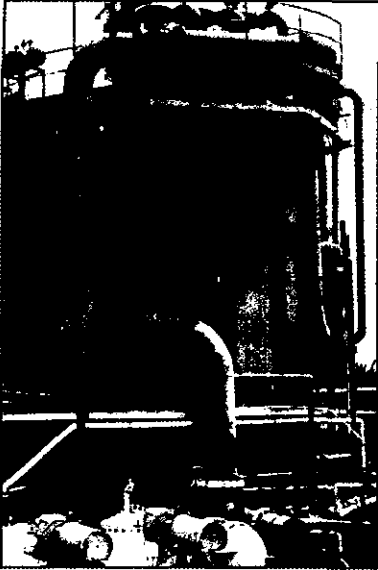
또한 이러한 전력생산을 위한 목적 이외에 다른 여러 가지 용도로 사용되는 복합플랜트의 연구도 수행되고 있으며, 이를 표로 정리하면 그림1과 같다.



[그림 2] Overview of the Mini-OTEC system

3. 국외 기술개발 현황

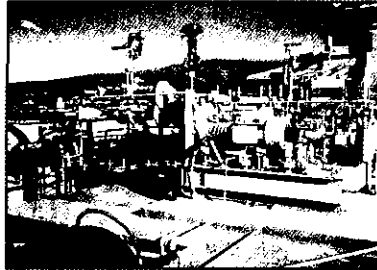
OTEC 발전의 기본원리는 1881년 D'Arsonval에 의하여



[그림 3] Open cycle OTEC plant at Keyhole Point, Hawaii

제시되었다. 이후 프랑스의 Claude가 쿠바의 마탄자만 (Matanzas Bay)에 40kW급 육상형 OTEC 플랜트를 건설한 것이 최초의 시도이다.

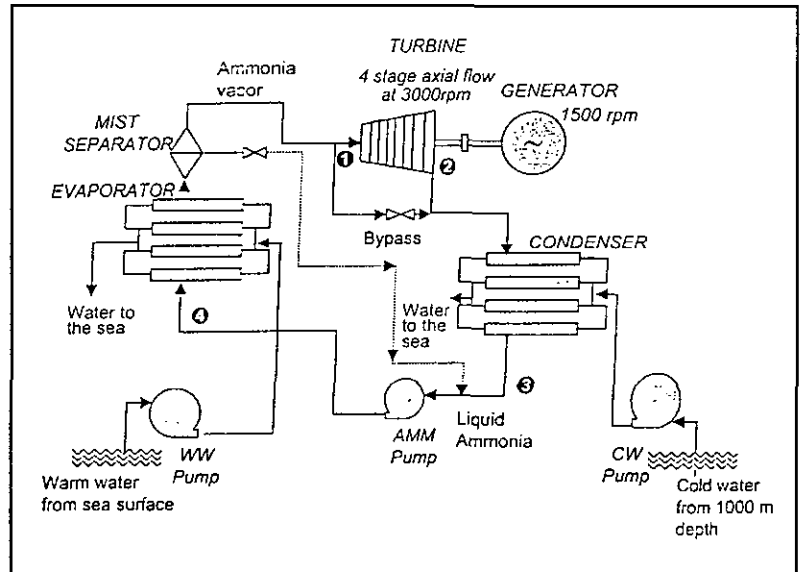
1973년 이전까지 미국은 값싼 석유와 석탄 및 원자력 발전에 의한 전력 생산이 주를 이루었던 중 환경 친화적인 에너지 개발과 유가 급등에 따른 대체에너지 개발의 필요성을 느끼게 되었다. 따라서, 1975년 설립된 에너지 개발청(Energy Research and Development Administration : ERDA)에서 1976년부터 해양 온도차 발전 개발 계획을 위한 연구를 부분적으로 시작하였다. 이



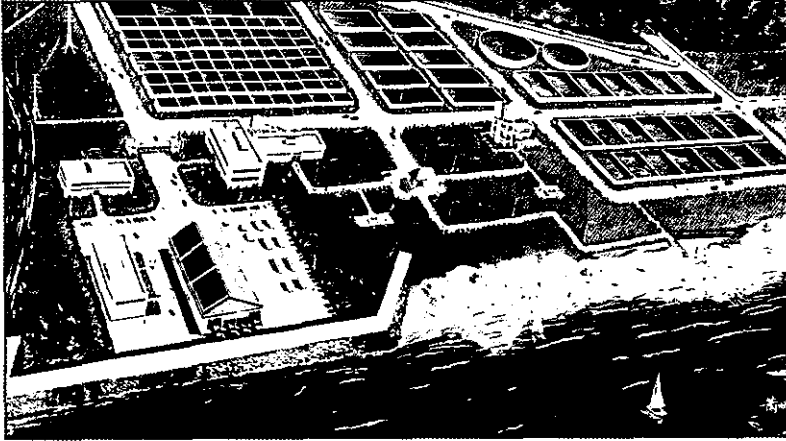
[그림 4] Closed cycle OTEC plant at Keahole Point, Hawaii

프로젝트는 이후에 조직된 미에너지성 (Department of Energy : DOE)에 흡수되어 해상청(Maritime Administration : MARAD)과 함께 OTEC 발전 기술 연구로 추진되게 되었다. 이에 따라, 1979년 하와이의 Keahole Point에서 50kW급 실

험용 폐쇄형 사이클 (closed cycle) 해양온도차발전 시스템 (Mini-OTEC, 그림2)이 최초의 실험에 성공하게 되었다. 이후 DOE에 의하여 OTEC - 1(1MW급)이라는 두 번째 플랜트가 제작되었다. 그러나 OTEC - 1은 터빈과 발전기를 설치하지 않고 시스템의 성능을 예측하고 환경에 대한 영향을 연구하는 목적으로 사용되었으며, 이러한 주도적인 OTEC 플랜트 개발 노력의 결과 미국이 가장 앞선 기술과 연구 실적을 보유하고 있다. 현재는 DOE의 주도로 OTEC 발전소를 하와이와 푸에르토리코에 설치하고 있으며, 중형 OTEC 발전소를 세워 상업적 활용에 대한 타당성 테스트를 계획하고 있다.



[그림 5] Schematic of 1 MW floating OTEC plant in India



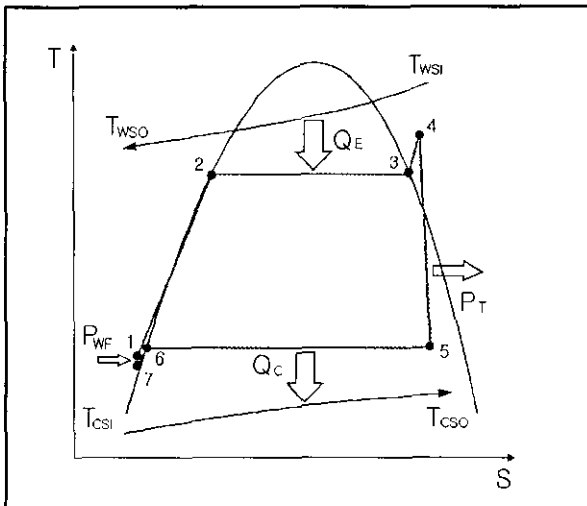
[그림 6] Conceptual design of the Ocean Thermal Park in Taiwan

일본에서도 역시 제1차 에너지 파동 이후 본격적인 연구가 시작되었으며, 1974년부터 도쿄전력(주), 규슈전력(주), 사가대학, 일본전지종합기술연구소가 공동으로 OTEC 발전의 경제성과 기술적 검토에 나서 1981년에 남태평양 나우루공화국 해역에 최대 출력 120 kW 급의 시험발전소를 세워 성공한 바 있다. 또한 1982년 자국 내 한 섬에서 OTEC 시험운전을 실시하였다. 이를 토대로 MW 단위의 상업발전소 건설을 추진하고 있다.

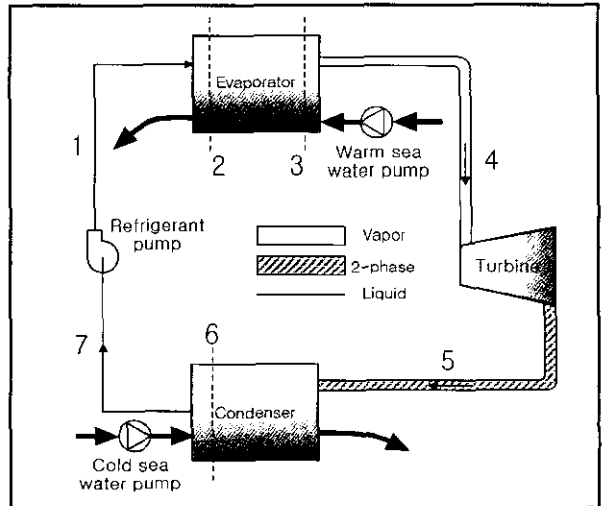
1999년 현재는 하와이에 위치해 있는 자연에너지연구소(NELHA)에서 폐쇄형 50kW급 OTEC 플랜트에 관한 실험이 수행 중이다. 이와 함께 심해에서 끌어올린 냉수로 다양한 산업(해산물 양식, 특용 작물 재배 등)에

응용하는 복합시스템 개발 연구와 함께 국방부에서 추진중인 Diego Garcia 해군기지에 1MW급의 OTEC 플랜트를 설치하여 심해수의 냉난방 이용을 포함한 발전시설로의 활용이 실용화되고 있는 추세이다.

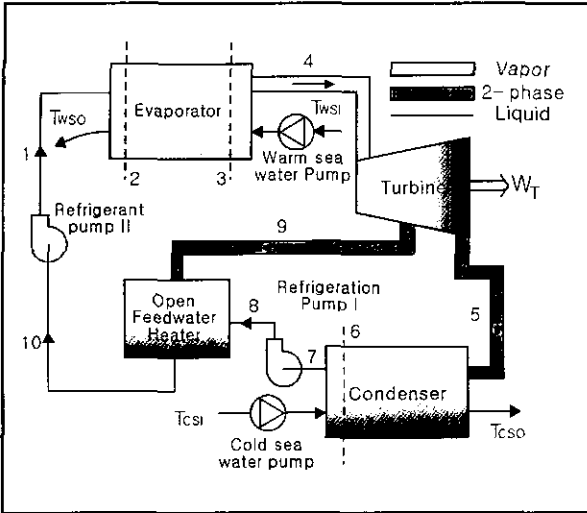
또한 사가대학에서는 자체 OTEC 연구소에서 R-22와 암모니아를 사용하여 75kW의 전력을 생산하는 OTEC 플랜트를 제작, 실험하였으며 각종 고효율 사이클 및 각종 열교환기를 사용



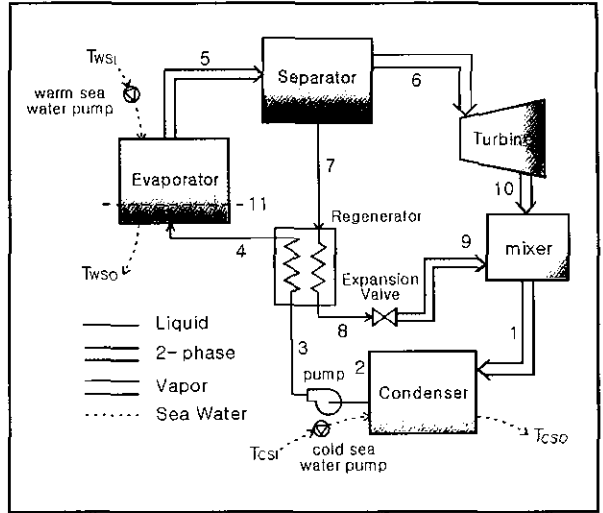
[그림 7] T-s diagram of a simple closed cycle OTEC system



[그림 8] Schematic of a closed cycle OTEC system



[그림 9] Schematic of a regeneration cycle OTEC system



[그림 10] Schematic of a Kalina cycle OTEC system

하여 그 성능을 비교·실험을 수행하고 있다. 또한 현재 인도정부와 함께 해양 부양형의 1MW급 OTEC 플랜트를 설계, 제작 중이며 2000년 말에 상용 가동 예정으로 활발히 개발을 추진하고 있다.

대만에서도 OTEC 상용화 계획을 위하여 미국의 하와이대학의 태 평 양 첨 단 기 술 연 구 소 (PICHTR)에게 이 계획을 주관해주도록 지원하여, 50 MW급의 플랜트를 대만 동해안에 설치하기 위한 연구를 수행하였다. 그 첫 단계로써 5 MW급 폐쇄형 OTEC 파이롯 플랜트가 계획되어 OTEC 시스템과 함께 여러 가지 복합시스템이 같은 장소에 설치되는 Ocean Thermal Park 그림 6라는 개념의 설계가 완료

되었으며, 이를 복합용도 발전소로의 제작을 추진 중에 있다. 현재는 타이완의 OTEC/DOWA 국제 사무국에서 다양한 정보에 관한 활발한 출판 및 자료 연구를 수행하고 있다.

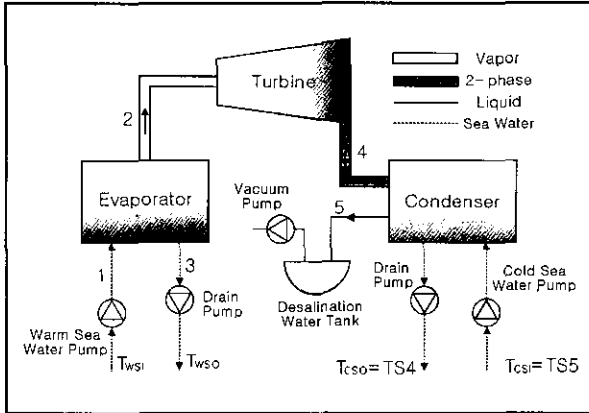
4. OTEC 사이클의 개요

OTEC 사이클은 크게 폐쇄형 사이클(closed cycle), 개방형 사이클(open cycle), 그리고 혼합형 사이클(hybrid cycle)의 세 종류로 나눌 수 있다.

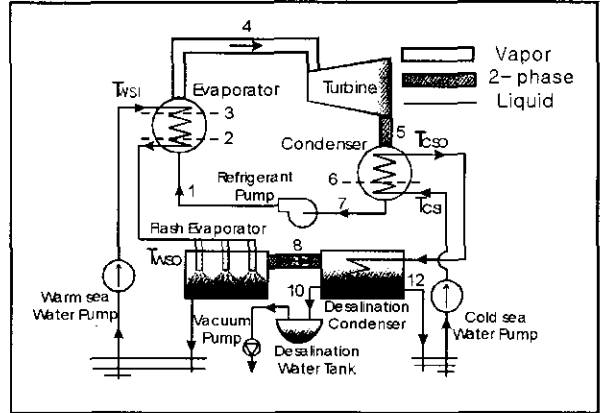
폐쇄형 사이클은 작동유체를 이용하여 터빈을 회전시키는 사이클이며, 증발기로 과냉상태의 작동유체(R22, 암모니아, 프로필렌 등)가 들어가 고온의 표층수와 열교환을 통하여 과열증기상

태가 되어 증발기를 나와 터빈을 가동시킨 후 2상 상태가 되어 응축기로 유입, 저온의 심해수에 의하여 과냉상태로 응축되는 기본 사이클을 거치게 된다.

기본적인 단순 Rankine 사이클 그림 7을 채용한 시스템의 개략도를 그림 8에 나타내었다. 이러한 단순 Rankine 사이클을 채용한 시스템 이외에 터빈으로 들어간 증기의 일부분을 추가하여 Open feed water heater를 통과하며 증발기에 들어가기 전의 작동유체를 가열하는 재생 Rankine 사이클 그림 9이 있고, 또한, 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 이용하여 증발기에서 암모니아를 증발시킨 후 분리기에서 포화증기와 포화액을 분리, 포화증기로 터빈을 구동한 후 다



[그림 11] Schematic of an open cycle OTEC system



[그림 12] Schematic of a hybrid cycle OTEC system(Integrated hybrid system)

시 혼합기에서 혼합하게 되는 Kalina 사이클 그림10등이 있다.

개방형 사이클은 폐쇄형 시스템과는 달리 해수 자체를 작동유체로 사용한다. 유입 유체가증기압 이하(약 2.5kPa)로 유지되는 기화기(flash evaporator)에서 순간적으로 기화되어 터빈을 구동한 후 팽창되어 응축된다.

이러한 방식은 해수 속에 녹아 포함되어 있는 수소, 산소 등의 가스가 기화기 내에서 해수 증발과 함께 발생하게 되면서 시스템 효율에 치명적인영향을 미치게 되므로, 이러한 불응축가스(Non-Condensable Gas : NCG)를 시스템으로부터 제거하는데 있어 전체 출력의 약 10%정도의 부가적인 에너지를 필요로 하게 된다.

개방형 사이클의 효율은 비록 다른 사이클에 비하여 낮으나, 다음과 같은 장점을 갖고 있다.

- 1) 작동유체를 사용하지 않으므로 심해수와 표층수의 온도차 대부분을 전력생산에 사용할 수 있게 된다.
- 2) 구성요소의 간단함이 장점으로 OTEC 사이클의 상용화를 저해하는 막대한 초기설치비용을 큰 폭으로 줄일 수 있다.
- 3) 기타 작동유체를 사용하는 사이클에 비하여 직접 해수를 사용한다는 점에서 환경친화적이다.
- 4) 전력생산 이외에 담수생산을 할 수 있다.

그러나 개방형 사이클의 경우 터빈 입·출구의 압력차가 작아

터빈 일의 양이 작아지게 되며 시스템의 압력 또한 매우 낮아 유체의 비체적이 커져 시스템의 크기가 증가하게 되며, NCG가스를 제거하기 위한 추가 에너지가 필요하다는 점이 단점으로 지적되고 있다.

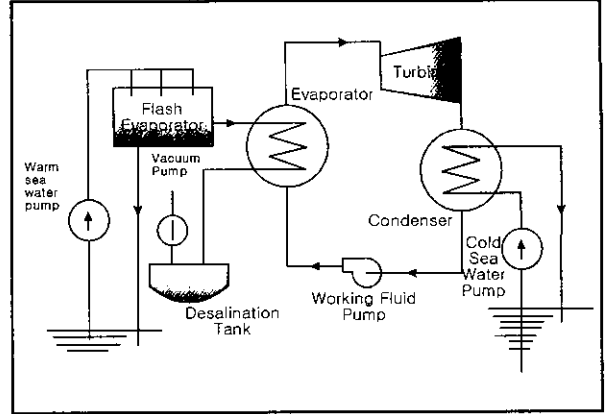
혼합형 사이클은 폐회로와 개회로 사이클을 결합한 형태를 취하고 있다. 이러한 혼합형 사이클에 대한 연구는 담수 생산과 효율 향상을 동시에 취하기 위하여 이루어지고 있다. 사이클은 기화기의 위치에 따라 Integrated 혼합형 사이클과 Joint 혼합형 사이클의 2가지 방식으로 나누어 진다.

Integrated 혼합형 사이클은 고온의 표층수가 증발기 내에서

작동유체와 열교환을 한 후 기화기에 유입되어 수를 생산하는 시스템을 말하며 Joint 혼합형 사이클이란 고온의 표층수가 먼저 기화기 내에서 증발하여 증발기 내에서 작동유체와 열교환을 한 후 담수를 생산하는 시스템이다. 이 중 Integrated 혼합형 사이클을 채용하는 경우가 단위 전력생산 비용이 감소하는 장점이 있다.

5. 결론

이용이 가능한 해양 천연 에너지 중에서 해양 온도차 이용 기술에 대해서만 간략히 소개하였다. 여기서 언급된 기술이 여러 가지 지리적, 경제적 여건으로 인해 아직 국내에서는 널리 연구 개발되지 않고 있는 실정이다. 그러나, 환경 문제가 점점 심각하게 고려되고 있고, 또한 원유가의 상승 및 변동을 예측하기 힘든 상황에서는 이와 같은 해양 온도차를 이용한 천연 에너지의 활용 기술의 개발에 대해 국가적인 관심과 지원이 절실히 요구되고 있다. ㉓



[그림 13] Schematic of a hybrid cycle OTEC system(Joint hybrid system)