

# 전력 및 담수생산을 위한 해양온도차발전에 대한 연구

박성식\*, 김남진\*\*

\*제주대학교 에너지공학과(pss5153@jejunu.ac.kr), \*\*제주대학교 에너지공학과(jnkim@jejunu.ac.kr)

## Study on OTEC for the Production of Electric Power and Desalinated Water

Park, Sung-Seek\* Kim, Nam-Jin\*\*

\*Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University(pss5153@jejunu.ac.kr),  
\*\*Dept. of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University(jnkim@jejunu.ac.kr)

### Abstract

Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) power plants have been examined as a viable option for supplying clean energy. This paper evaluated the thermodynamic performance of the OTEC Power system for the production of electric power and desalinated water. The results show that newly developed fluids such as R32, R125, R143a, and R410A that do not cause stratospheric ozone layer depletion perform as well as R22 and ammonia. Overall cycle efficiency of open cycle is the lowest value of 3.01% because about 10% of the gross power is used for pumping out non-condensable gas. Also, the hybrid cycle is an attempt to combine the best features and avoid the worst features of the open and closed cycles. The overall cycle efficiency of hybrid cycle is 3.44% and the amount of desalinated water is 0.0619 kg/s.

Keywords : 해양온도차발전(OTEC), 랭킨 사이클(Rankine cycle), 개방형 사이클(Open cycle), 혼합형 사이클(Hybrid cycle), 담수(Desalinated water)

### 1. 서론

해수면의 온수와 심해저의 냉수의 온도차를 이용해서 발전하는 해양온도차발전(Ocean Thermal Energy Conversion 혹은 OTEC)의 개념은 1881년 프랑스의 공학자인 d'Arsonval가 처음으로 제안하였고,<sup>1)</sup> 그 후 1930년에 Claude는

쿠바의 Matanzas만에서 플랜트를 설계하여 실지 실험을 수행하였다.<sup>2)</sup>

그러나 뚜렷한 성과없이 부진하던 연구가 1970년대의 오일과동으로 인해 많은 국가들이 대체 에너지를 찾기 시작하였고, 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 연구소는 1MW급 OTEC용 열교환기에 대한 실험을 하와이에서 성공리에 수행하였고, 1993년에는 OTEC 플랜트의 성능시험을 수행한 결과, 213kW의 전기를 생산하였고 시스템 구동에 필요한 전기를 제외하면 순수 출력은 60kW였다. 일본의 경우에는 구주의 사가대학에서 R22와 암모니아를 작동유체로 사용하는 75kW 출력의 OTEC 시스템을 갖추고 지난 20년간 OTEC용 열교환기와 새로운 사이클 개발과 담수화 기술개발 등 많은 연구를 수행하고 있다.<sup>3)4)5)</sup> 일반적으로 OTEC 시스템은 전력을 생산하는 것이 목적이지만 개방형 사이클과 혼합형 사이클을 이용할 경우 전력 및 담수를 동시에 얻을 수 있는 장점이 있다.<sup>6)</sup> 따라서 본 연구에서는 우리나라의 원자력발전소의 온배수를 이용하여 전력 및 담수생산을 위한 최적의 작동유체와 사이클에 대해서 알아보려 한다.

## 2. OTEC 사이클

### 2.1 단순 랭킨 사이클

그림 1은 단순 랭킨 사이클을 이용한 OTEC 발전시스템의 개략도이다. 과냉액체가 증발기에 들어가며 유체가 따뜻한 표층수와 열교환을 통하여 증발이 일어나 과열증기상태로 증발기를 나오게 된다. 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.

### 2.4 개방형 사이클

그림 2는 개방형 사이클의 개략도이다. 이

사이클은 해수자체를 작동유체로 사용한다. 유입유체가 증기압 이하(약 2.5kPa)로 유지되는 기화기에서 순간적으로 기화되어 터빈을 통해 팽창한 후 응축된다. 본 연구에서 고려한 응축기는 담수생산을 고려하기 위해 직접접촉열교환 방식이 아닌 간접접촉열교환 방식을 채택하였다. 이 경우 수소, 산소 등 해수에 녹아있던 가스가 기화기내에서 해수 증발과 동시에 발생하게 된다. 이러한 불응축가스를 시스템으로부터 제거하는데 있어 부가적인 에너지를 필요로 한다. 개방형 사이클의 경우 불응축가스를 제거하는데 소요되는 동력은 전체출력의 약 10%에 이른다고 보고되어 있다.<sup>7)</sup>

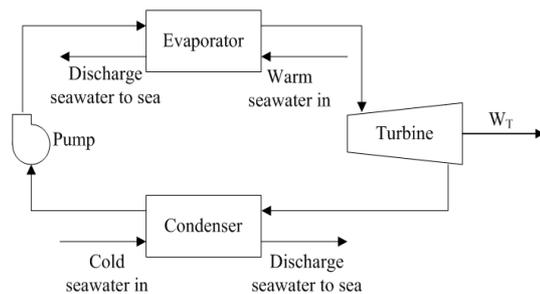


그림 1. 단순 랭킨사이클

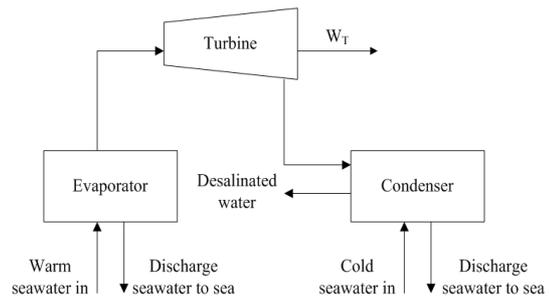


그림 2. 개방형 사이클

### 2.5 혼합형 사이클

그림 3은 혼합형 사이클로 개방형과 폐쇄형 사이클을 결합한 것이다. 혼합형 사이클의 연구는 담수생산과 효율향상을 동시에 취

하기 위해 만들어졌다. 이러한 혼합형 사이클은 기화기 위치에 따라 Integrated 혼합형

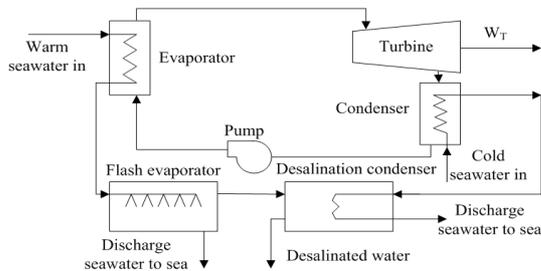


그림 3. 혼합형 사이클

사이클과 Joint 혼합형 사이클로 나뉘어진다. Integrated 혼합형 사이클이란 표층수가 증발기내에서 작동유체와 열교환을 한 후 기화기에 유입되어 담수를 생산하는 시스템을 말하며, Joint 혼합형 사이클이란 표층수가 먼저 기화기내에서 증발하여 증발기내에서 작동유체와 열교환을 한 후 담수를 생산하는 시스템을 말한다. Uehara 등은 2가지 사이클 중 Integrated 혼합형 사이클을 사용하는 경우가 단위 전력생산 비용이 감소함을 증명하였다.<sup>4)</sup> 따라서 본 논문에서는 Integrated 혼합형 사이클을 채택하였고 혼합형 사이클의 경우 불응축가스를 제거하는데 소요되는 동력은 전체출력의 약 2.8%에 이른다고 보고되어 있다.<sup>8)</sup>

### 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 입출구 온도, 심층수의 입구온도를 표 1과

같은 조건하에서 모사하였다. 작동유체가 변함에 따라 터빈으로부터 생성되는 일의 양이 변하므로 시스템의 효율 또한 변하게 된다. 그리고 다양한 작동유체에 대하여 터빈일이 변하므로 응축기를 통하여 차가운 해수로전달되는 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.

표 1. 사이클 계산 조건

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
	증발기의 열전단율 (kW)	150
	표층수의 질량유량 (kg/s)	11.96
개방 사이클	심층수의 질량유량 (kg/s)	11.72
	재생기의 유효도	0.85
	기화기 압력 (kPa)	2.5
	표층수 질량유량 (kg/s)	6.16
	심층수 질량유량 (kg/s)	5.98

그리고 작동유체마다 증발잠열이 다르므로 동일한 증발용량을 내는 경우에도 질량유량이 다르게 마련이다. 따라서 이같은 점을 고려하기 위해서 터빈과 펌프의 체적유량은 변하는 것으로 간주하였다. 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 부분

으로 나누었다. 따라서 UA 값과 LMTD 값을 준 경우에 작동유체와 해수사이의 열교환은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.<sup>9)</sup>

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

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

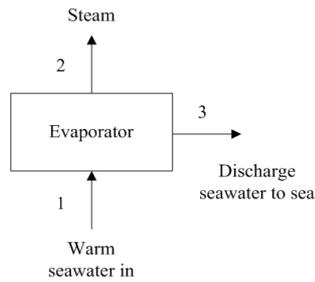


그림 4. 기화기 개념도

또한, 기화기는 개방형 사이클과 혼합형 사이클에만 사용되는 중요한 요소이다. 기화기의 종류에는 해수를 증발시키는 메카니즘에 따라 open channel flow, falling films, falling jets, 그리고 vertical spouts 등이 있다. 따라서 본 연구에서는 모든 메카니즘에 적용할 수 있는 일반적인 방법을 사용하여 기화기를 모델링하였으며, 기화과정에서 에너지 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_1 h_1 &= \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 \\
 \dot{m}_1 &= \dot{m}_2 + \dot{m}_3
 \end{aligned}$$

위의 에너지 방정식을 정리하면 기화기내

에서 증발하는 수증기의 양( $\dot{m}_2$ )을 계산할 수 있으며, 이는 곧 담수생산량을 의미한다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 작동유체 선정

그림 5는 표 1의 조건을 기준으로 단순 랭킨 사이클에서 계산한 9개의 작동유체에 대한 시스템 효율을 나타낸 것이다. 시스템효율이란 터빈출력에서 펌핑동력을 제외한 총출력을 증발용량으로 나눈 값으로 그림으로부터 볼 수 있듯이 본 연구에서 고려한 작동유체들의 열효율 차이는 매우 작음을 알 수 있다. 또한, 그림 6는 R22를 기준으로 한 각 작동유체의 상대적 터빈의 크기를 보여준다. 터빈의 크기는 터빈 입·출구의 엔탈피 차를 터빈입구의 비체적으로 나눈 값으로 정의할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 R32, R125, R143a, R410a를 사용하면 많은 연구자들이 제안한 R22와 R717을 사용하는 경우 보다 터빈 크기가 작아짐을 알 수 있다. 따라서 그림 5와 그림 6의 결과로부터 ODP 0, GWP 0.11인 R32를 사용하면 효율을 높이고, 초기 투자비용도 줄일 수 있다. 그림 7은 표 1의 기준으로 작동유체를 R32로 하여 심층수의 온도를 4°C 고정시키고 표층수의 온도변화에

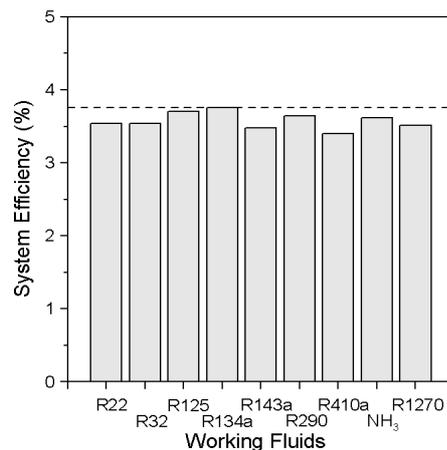


그림 5. 작동유체별 효율비교

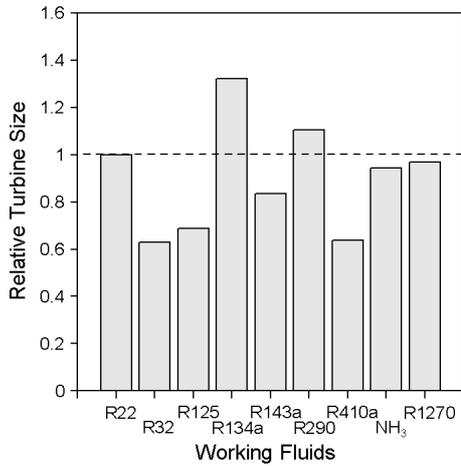


그림 6. 상대적 터빈의 크기

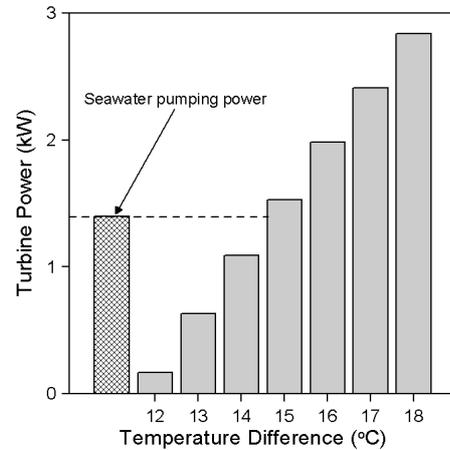


그림 7. 온도차에 따른 터빈출력

다른 총 출력의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 해수를 펌핑하는데 소요되는 펌프동력이 15°C이하 일 때 사이클의 출력보다 높기 때문에 출력이 0보다 작아지게 된다. 따라서 단순 랭킨 사이클로 부터 전기를 생산하기 위해서는 표층수의 온도와 심층수의 온도가 15°C이상 되어야 한다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 사이클 간 효율비교 및 담수생산량

그림 8은 작동유체를 R32로 하여 단순 랭킨 사이클, 개방형 사이클, 혼합형 사이클의 효율을 비교한 그림이다. 그림에서와 같이 혼합형 사이클의 효율은 해수측 펌핑동력과 불응축가스제거 동력을 제외하면 단순 랭킨 사이클의 효율과 같음을 알 수 있다. 또한, 개방형 사이클은 담수 자체를 사용하기 때문에 기화시 담수에 녹아 있던 가스가 나오며 그 가스를 제거하기 위한 추가 동력이 필요하므로 사이클의 효율이 낮게 나왔다. 따라서 전력 및 담수를 생산하기 위한 사이클로는 혼합형 사이클이 적당하다는 것을 알 수 있다. 또한, 혼합형 사이클은 단순 랭킨 사이클과 개방형 사이클을 결합한 사이클로 생산되는 담수량은 같으며, 본 연구의 조건에서는 생산되는 담수량은 0.0619 kg/s로 계산되어졌다.

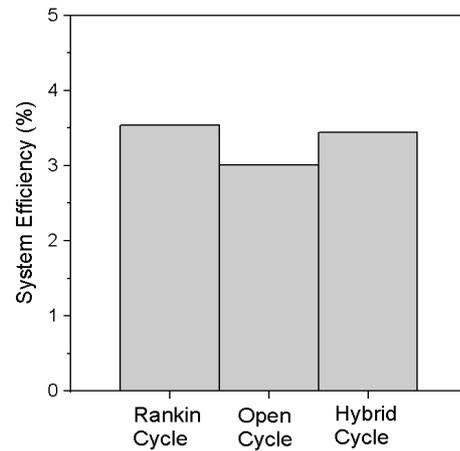


그림 8. 사이클 간 효율비교

#### 4.3 온배수를 이용한 사이클 효율

그림 9는 동해안 심해수의 온도이고 그림 10은 2005년 월성 원자력발전소 온배수의 평균온도를 나타낸 그림이다. 원자력발전소 온배수 온도의 정확한 데이터를 측정하기 어렵기 때문에 일반적으로 알려진 해수와 온배수의 온도차 7°C를 해수의 온도에 더하여 모사하였다. 그림 11과 그림 12는 그림 10의 원자력 발전소 온배수의 온도를 표층수의 온도로 하고 작동유체를 R32로 하였을 때의 혼합형 사이클의 시스템효율과 출력을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 여름철의 효율과

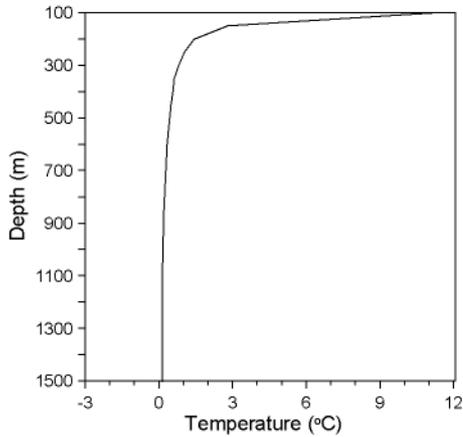


그림 9. 동해안 심해수 온도

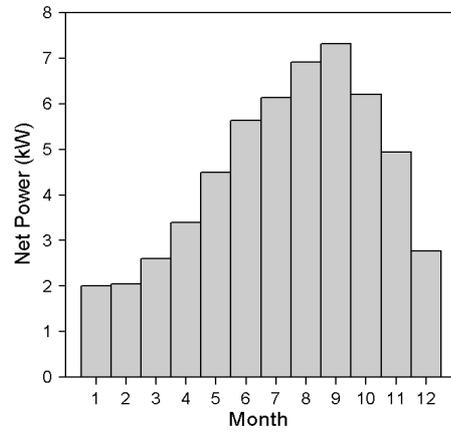


그림 12. 월별 최종 출력

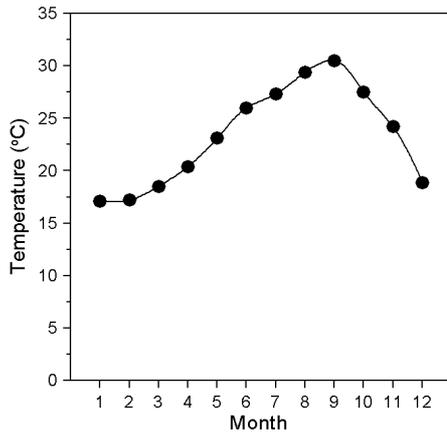


그림 10. 원자력발전소 온배수 온도

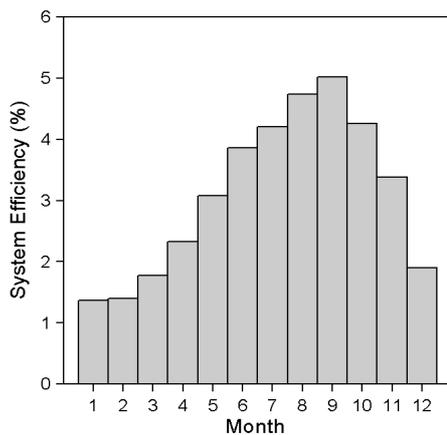


그림 11. 월별 시스템 효율

출력이 가장 좋고 겨울철이 다소 낮음을 알 수 있다. 그러나 본 결과로부터 OTEC 사이클의 약점인 겨울철에도 펌핑동력과 불응축가스 제거에 필요한 동력을 제외하고도 (+) 출력을 얻을 수 있는 것으로 나타남에 따라 전력 및 담수생산을 위한 혼합형 사이클의 가능성을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

- (1) OTEC 사이클의 작동유체로서 R32, R1 25, R134a, R410a를 고려할 수 있음을 알았다.
- (2) 작동유체를 R32로 사용할 경우 표층수와 심층수의 온도차가 최소 15°C 이상일 때 전기를 생산할 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 원자력 온배수를 이용하였을 경우 겨울철에도 펌핑동력과 불응축가스 제거에 필요한 동력을 제외하고 (+) 출력을 얻을 수 있는 것으로 나타남에 따라 전력 및 담수생산을 위한 혼합형 사이클의 가능성을 확인할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수

행된 연구임(No. R01-2008-000-20575-0)

### 참 고 문 헌

1. D'Arsonval, A., "Utilisation de forces naturelles", Revue Scientifique, Vol. 17, pp. 370~372, 1881.
2. Claude, G., "Power from the Tropical Seas", Mechanical Engineering, Vol. 52, No. 12, pp. 1039~1044, 1930.
3. Uehara, H, and Ikegami, Y., "Optimization of a Closed - Cycle OTEC system", J. of solar energy Engineer- ing, Vol. 112, pp.247 ~ 256, 1990.
4. 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., Vol. 118, pp. 115~122, 1996.
5. Ikegami, Y., Sasakib, H., Goudab, T., Uehara, H., "Experimental study on a spray flash desalination", Desalination, Vol. 194, pp. 81~89, 2006.
6. Kim, N. J., Kim, C. N., and Chun, W. G., "Using the condenser effluent from a nuclear power plant for Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC)", International Communications in Heat and Mass Transfer Vol. 36, pp. 1008-1013, 2009.
7. Penney, T., Bharathan, D., Althof, J., and Parsons, B., "Open-Cycle Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Research: Progress Summary and a Design Study," ASME Paper, 84-WA/Sol-26, 1984.
8. Panchal C.B. and Bell K.J., "Simultaneous production of desalinated Water and power using a hybrid - cycle OTEC plant", Transaction of the ASME, Vol. 109, pp. 156 ~ 160, 1987.
9. 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